

Trabajo de Final de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Análisis comparativo térmico, higrotérmico y medioambiental de las diferentes soluciones constructivas de cubierta en el clima mediterráneo

MEMORIA

Autor:

Taron Hamkhiyan

Director:

Pere Alavedre Ribot

Tutor en la empresa:

Licinio Alfaro Garrido

Convocatoria:

Mayo del 2016



**Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Industrial de Barcelona**



1. Resumen

Este proyecto pretende realizar un análisis comparativo térmico, higrotérmico y medioambiental de las diferentes soluciones constructivas de cubierta en el clima mediterráneo.

El estudio se compone de cuatro bloques principales; cubiertas típicas del mediterráneo, ¿Cuáles son y a qué se deben?, ¿Cuál ha sido su evolución a lo largo del último siglo?, ¿Qué materiales se han usado tradicionalmente? El segundo bloque es el estudio térmico e higrotérmico de las cubiertas seleccionadas, es decir, análisis de las respectivas transmitancias térmicas y de las condensaciones exteriores e intersticiales. ¿Cuál de esas cubiertas planas transitables verificaba o sigue verificando las normas y reglamentos que han ido marcando las exigencias de la construcción en las últimas décadas? El tercer bloque trata de un estudio del impacto medioambiental de las soluciones constructivas escogidas, análisis de los residuos de construcción. Y por último, el cuarto bloque, que hace referencia a una comparación de los procesos de certificación ambiental de los sellos BREEAM, LEED y VERDE, respecto los materiales y residuos.

Desgraciadamente, sólo con el estudio de las cubiertas y con materiales genéricos, no basta para poder realizar una certificación de los sellos. Dado la ausencia de las normas que obliguen la utilización de un porcentaje de materiales reciclado o el uso de las eco-etiquetas se hace imposible realizar un análisis de las cubiertas. Por lo consiguiente se ha realizado una comparación general de los criterios de cada sello.

Para poder responder a todas estas preguntas, se han consultado libros, a profesionales de la construcción y sobre todo el banco de datos de los materiales y soluciones constructivas del Instituto de Tecnología de la Construcción de Catalunya, BEDEC.

2. Índice

1. RESUMEN	1
2. ÍNDICE	3
3. GLOSARIO	7
4. PREFACIO	11
5. INTRODUCCIÓN	12
6. SOSTENIBILIDAD: CONCEPTOS BÁSICOS	13
6.1. El desarrollo sostenible	13
6.2. Los tres pilares de la sostenibilidad	13
6.3. Sostenibilidad en la edificación	14
6.3.1. Consumo de energía del edificio según su ciclo de vida	15
6.3.2. Aspectos que condicionan la demanda	16
6.3.3. Estrategias para limitar la demanda	16
7. MARCO LEGAL	19
7.1. Normativas Básicas de Edificación	20
7.1.1. Exigencias de la Normativa Básica de Edificación de 1979 y 1987	20
7.1.2. Código Técnico de la Edificación	21
7.1.3. Exigencias del DB-HE 1 en transmitancia térmica	22
7.1.4. Exigencias del DB-HE 1 en condensación superficial e intersticial	24
8. INFLUENCIA DEL CLIMA MEDITERRÁNEO EN LA VIVIENDA	26
8.1. Factores climáticos y parámetros medioambientales	27
8.1.1. Del clima a la cubierta	28
9. SOLUCIONES DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS	29
9.1. Soluciones tradicionales	30
9.1.1. Azotea catalana	30
9.1.2. Cubierta plana transitable pre-convencional o emergente en los 60	32
9.1.3. Cubierta plana transitable convencional sin cámara de aire	33
9.1.4. Cubierta plana transitable invertida sin cámara de aire	35
9.2. Soluciones posteriores a 1979 y actuales	36
9.2.1. Cubierta plana transitable convencional con cámara de aire	37
9.3. Soluciones actuales	38
9.3.1. Cubierta plana convencional e invertida sin cámara de aire	38

9.3.2. Cubierta plana convencional e invertida con cámara de aire	42
10. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS TÉRMICOS E HIGROTÉRMICOS	45
10.1. Comparación de los resultados de transmitancia térmica	45
10.2. Comparación de los resultados de condensación	47
11. ESTUDIO DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS	51
11.1. Información medioambiental del BEDEC.....	52
11.1.1. Coste energético y emisión de CO ₂	52
11.1.2. Residuos.....	52
11.2. Análisis medioambiental de los materiales utilizados	53
11.2.1. Comparación de los resultados de energía y emisiones	53
11.3. Desglose de los residuos según la LER.....	55
11.3.1. Introducción a los residuos de construcción	55
11.3.2. Clasificación de los residuos de construcción y demolición	56
11.3.3. Lista Europea de Residuos.....	56
11.3.4. Comparación de los resultados obtenidos de residuos	57
11.3.5. Sostenibilidad y generación de residuos	59
11.3.6. Plan de gestión de residuos	60
12. COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS DE SELLOS AMBIENTALES.....	61
12.1. Contexto y objetivos	61
12.2. Certificación de materiales y residuos BREEAM	63
12.2.1. Crédito: Materiales de bajo impacto ambiental.....	63
12.2.2. Crédito: Gestión de residuos	64
12.3. Certificación de materiales y residuos LEED	67
12.3.1. Crédito: Materiales de bajo impacto ambiental.....	67
12.3.2. Crédito: Gestión de residuos	67
12.4. Certificación de materiales y residuos VERDE	68
12.4.1. Crédito: Impacto de los materiales de construcción	68
12.4.2. Crédito: Transmitancia de los cerramientos	69
12.4.3. Crédito: Gestión de residuos de la construcción	70
12.5. Utilización de materiales reciclados y reutilizados	71
12.5.1. Comparativa de las certificaciones utilización materiales reciclados.....	71
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA.....	74

Referencias bibliográficas	74
Bibliografía complementaria	76
ANEXOS	77
Informe de condensaciones eCondensa	77
Azotea catalana	77
Cubierta pre-convencional o Emergente en los 60	78
Cubierta convencional caliente I	79
Cubierta invertida caliente I	80
Cubierta convencional fría I	81
Cubierta convencional caliente II	82
Cubierta invertida caliente II	83
Cubierta convencional fría II	84
Cubierta invertida fría	85
Tablas de resultados de energía, emisiones y residuos	86
Tablas de residuos según la clasificación LER	90
AGRADECIMIENTOS	95

3. Glosario

U [W/m^2K]: Transmitancia térmica de un elemento

U_{LIM} [W/m^2K]: Transmitancias térmicas límite de la envolvente

U_{REF} [W/m^2K]: Transmitancias térmicas de la envolvente del edificio de referencia

U_{PRED} [W/m^2K]: Transmitancias térmicas de pre-dimensionamiento de la envolvente

f_{Rsi} : Factor de temperatura de la superficie interior

$f_{Rsi,min}$: Factor de temperatura de la superficie interior mínimo

HR [%]: Humedad relativa

R_t [m^2K/W]: Resistencia Térmica

ρ [Kg/m^3]: Densidad volumétrica

δ [Kg/m^2]: Densidad superficial

e [cm]: espesor

λ [W/mK]: Conductividad

G [Kg/h]: Ritmo de producción de la humedad interior

N [h^{-1}]: Tasa de renovación de aire

V [m^3]: Volumen de aire del local

$T_{si,min}$ [$^{\circ}C$]: Temperatura superficial interior mínima aceptable

T_e [$^{\circ}C$]: Temperatura exterior de la localidad en el mes de enero

P_n [Pa]: Presión de vapor en la superficie de cada capa

$P_{\text{sat},n}$ [Pa]: Presión de vapor de saturación de cada capa

μ : Factor de resistencia a la difusión del vapor

UNE: Normas del Estado Española (Una Norma Española)

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

CTE: Código Técnico de la Edificación

NBE-CT-79: Condiciones Térmicas en los Edificios de la Norma Básica de Edificación, año 1979

NRE-AT-87: Norma Reglamentaria de Edificación de aislamiento térmico, en ámbito catalán, año 1987

RITE: Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios

DB-HE: Documento Básico de Ahorro de Energía

CTE-DA-DB-HE/2: Documento de apoyo al documento básico DB-HE Ahorro de energía 2

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

EGR: Estudio de Gestión de Residuos

PGR: Plan de Gestión de Residuos

RCD: Residuos de Construcción y Demolición

LER: Lista Europea de Residuos

BEDEC: Banco de Datos de la Construcción de ITEC

ITEC: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya

AC1: Azotea catalana

E60: Emergente en los 60

PCTC1: Plana Convencional Transitable Caliente I

PITC1: Plana Invertida Transitable Caliente I

PCTF1: Plana Convencional Transitable Fría

PCTC2: Plana Convencional Transitable Caliente II

PITC2: Plana Invertida Transitable Caliente II

PCTF2: Plana Convencional Transitable Fría II

PITF1: Plana Invertida Transitable Fría

LBM-50/G: Lámina asfáltica bituminosa de 5 Kg/m²

CO₂: Dióxido de carbono

HDPE: Polietileno de alta densidad

HFC: Hidrofluorcarbono

XPS: Poliestireno extruido

XPS-HFC: Poliestireno extruido con hidrofluorcarbono

4. Prefacio

El proyecto en si surge de la duda y el interés sobre el tema del bienestar en el hogar. Cuando se habla del bienestar, se han de tener en cuenta dos factores, uno debido a la comodidad higrotérmica, o ausencia del malestar térmico, y el otro debido a medioambiente, como garantía de la calidad de vida de los presentes y de las generaciones futuras.

Para realizar, adecuadamente este proyecto, con todo el rigor que con lleva, no fue necesario ningún edificio de estudio, ni una implementación física. Sin embargo, sí fueron imprescindibles conocimientos sólidos sobre la construcción y sobretodo de normativas, UNEs, para poder dar con todos los materiales convencionales y realizar una extrapolación generalizada a todas las cubiertas. Dichas normativas, en gran parte, fueron conseguidas gracias a las facilidades de la que dispone el Instituto de Tecnología de Construcción de Catalunya, sin cuya ayuda difícilmente se podría haber realizado este estudio con la precisión con la que se ha hecho.

5. Introducción

Desde los años setenta, la construcción ha ido sufriendo una importante regresión en la cantidad de las técnicas constructivas disponibles. La sociedad ha progresado y el nombre de requisitos han de satisfacer los edificios se ha disparado a la alza; así por ejemplo, la vida útil y el mantenimiento, el respeto al medioambiente, la seguridad durante el uso, etc. son requisitos que no se consideraban en las construcciones de los años setenta.

La cubierta está tomando un papel decisivo en un nuevo aspecto que se ha de tener presente en los edificios: la preocupación medioambiental. Efectivamente, la importancia creciente de la consideración de los impactos en el medio ocasionado se está traduciendo en una secuencia de nuevos requisitos que afectan desde la elección de los materiales hasta la eficiencia energética de los edificios.

Muchos de estos nuevos requisitos se harán sentir en la cubierta y repercutirán en las soluciones constructivas.

En definitiva, este estudio no pretende innovar nuevas soluciones constructivas o proponer mejoras a las existentes, sino analizar y estudiar las que aún perduran y las que no. Se hace necesario responder una serie de preguntas que marcaran los objetivos del proyecto; por un lado el ¿Cómo influye el clima mediterráneo en las soluciones constructivas y los materiales? Y por el otro, ¿Cuán adecuadas eran y/o son las soluciones constructivas? Todas estas dudas se verán solventadas a lo largo de este trabajo.

6. Sostenibilidad: conceptos básicos

6.1. El desarrollo sostenible

¿Qué es la sostenibilidad y el desarrollo sostenible? Y ¿Por qué es tan importante?

El informe de la Comisión Bruntland (1987) define el desarrollo sostenible como “aquél que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Según la DRAE: “Desarrollo que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente”.

Este concepto se introduce en 1987, en el marco de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Comisión Brundtland) mencionado anteriormente. Posteriormente, se confirma como prioridad internacional en la Conferencia de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (Cumbre de la Tierra, Río de Janeiro 1992).

6.2. Los tres pilares de la sostenibilidad

La sostenibilidad implica todas las facetas de la vida humana. Es decir, toda propuesta de sostenibilidad debe contemplar los tres aspectos fundamentales, que identifican cualquier actividad socioeconómica del hombre: el impacto sobre el medio ambiente, la repercusión social y la viabilidad o sostenibilidad económica ^[1].

Dicha propuesta debe abordar el mantenimiento de la biodiversidad, la salud humana y la calidad de vida en el futuro. Por otra parte, la sostenibilidad es un mecanismo de equilibrio, que solo puede ser alcanzada con la implicación de sectores clave “llamados pilares de la sostenibilidad”. De este modo, es decisivo decidir qué peso o importancia se da en la evaluación a cada uno de los pilares mencionados a continuación.

El pilar medioambiental: está relacionado con todos los aspectos referentes a la atmósfera, la tierra, las fuentes hídricas, la flora y la fauna, y tiene en cuenta aspectos

como la disminución del consumo de recursos, materiales y energía, el fomento del uso de materiales reciclados y la disminución de las emisiones al medioambiente.

El pilar económico: por su parte, tiene en cuenta aspectos relacionados con los costes derivados de las diferentes actividades y procesos de la industria, y se refiere a los costes de producción, de gestión de residuos al final de la vida útil y a los asociados a la incorporación de políticas medioambientales.

El pilar social: trata condiciones relacionadas con la permanencia del hombre en el entorno, y se refiere a aspectos como la seguridad y salud humana, la mejora de la calidad de vida y el confort, aspectos estéticos y a la compensación de las personas afectadas debido a las diferentes alteraciones generadas.

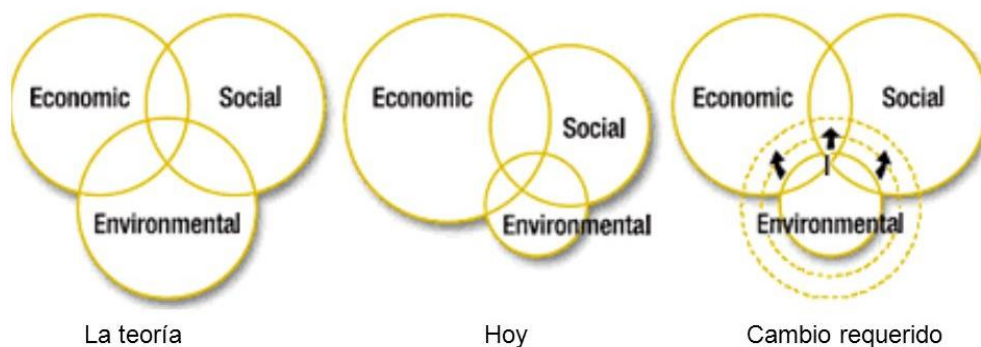


Imagen 1. Representación de los tres pilares de la sostenibilidad.

Fuente: Adams, 2006 (IUCN)

6.3. Sostenibilidad en la edificación

El sector de la construcción es, en comparación con otros sectores industriales, uno de los ámbitos de mayor consumo de recursos naturales (madera, minerales, agua y energía) y de generación de impactos ambientales. En los países de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) es el responsable de alrededor del 25-40% del consumo total de energía, de entre el 20 y el 30% del consumo de materias primas, del 30-40% de emisiones de gases de efecto invernadero y del 30-40% de la generación de residuos sólidos ^[2]. Por otro lado, las previsiones, en un futuro cercano, de la evolución mundial del consumo energético establece un incremento en la

demanda de un 50% en 2030. En este escenario cerca de la mitad de las inversiones necesarias deberían destinarse a cubrir la demanda energética de la edificación.

Queda evidente que se trata de un tema que no se puede ignorar o tomárselo con calma. Es imprescindible una serie de acciones y soluciones que ayuden a mitigar la huella que deja la construcción en el planeta. Por lo consiguiente, existe la necesidad de sentar las bases para implantar el concepto de desarrollo sostenible en el sector de la construcción.

6.3.1. Consumo de energía del edificio según su ciclo de vida

La eficiencia energética en este sector es muy importante. Dado que crece la necesidad de reducción y racionalización de los consumos energéticos correspondientes a la vida útil de los edificios.

Ahora bien, conviene destacar que el consumo energético del sector en su conjunto no se limita al correspondiente a la operación de los edificios (energía consumida durante la vida útil). Más bien, los procesos de fabricación de los materiales de construcción, el transporte de los mismos y los propios procesos de edificación dan lugar a consumos energéticos que no deben ser despreciados si se pretende llevar a cabo un análisis detallado del sector.

Si se tiene en consideración el hecho de que la mayor parte del consumo energético de un edificio resulta atribuible a la operación del mismo, la necesidad de mejorar su eficiencia energética con tal de reducir el consumo final del sector resulta más que evidente ^[3].

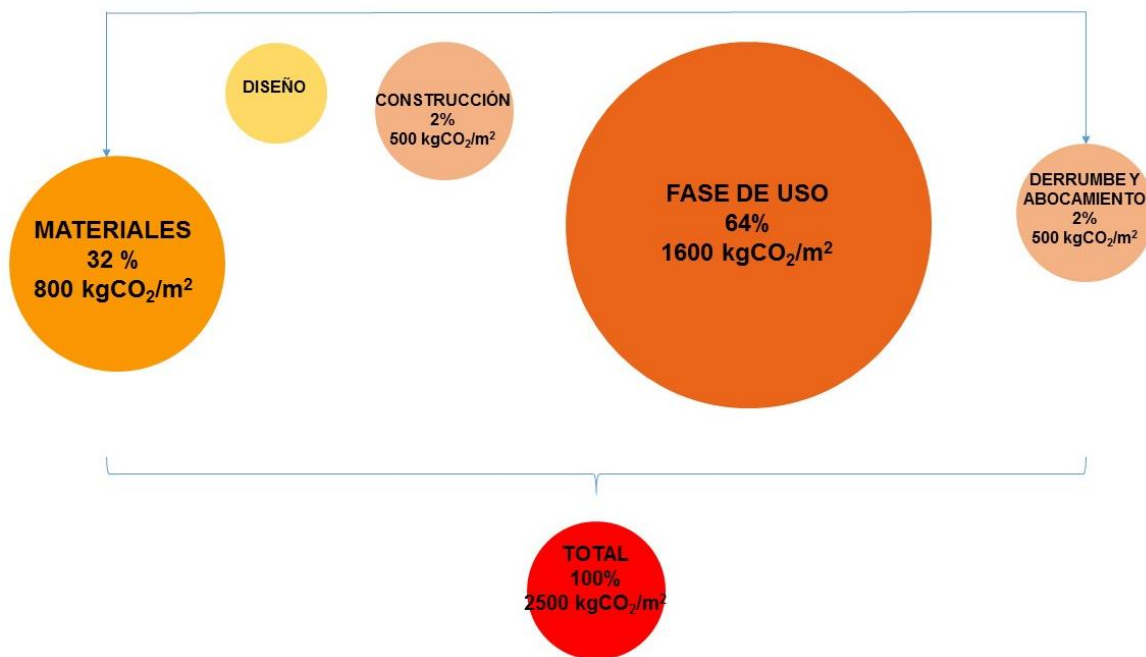


Imagen 2. Consumo energético de un edificio a lo largo de su ciclo de vida. Fuente: Curso Cuchi, A. “Com fer projectes sostenibles”, 2008.

6.3.2. Aspectos que condicionan la demanda

La exigencia de ahorro energético y el interés de muchos sectores contemporáneos por lo “natural” están sofisticando la envolvente térmica con la introducción de los sistemas pasivos de captación y acumulación energética.

Hoy, muchos edificios se diseñan pensando no sólo en la manera de perder la menor cantidad posible de energía, sino también en la de captar toda la posible. Para poder captar energía solar en invierno pueden utilizarse aparatos específicos de captación y almacenamiento energético, recurriendo a lo que se llama sistemas activos, o simplemente pueden introducirse elementos en la envolvente térmica del edificio que la conviertan en captadora de energía. A estos elementos se les llama sistemas pasivos y merecen un pequeño comentario porque afectan profundamente a la envolvente.

6.3.3. Estrategias para limitar la demanda

La demanda es una función del clima, de la ubicación, de las características de la envolvente térmica y de las condiciones de operación y funcionamiento del edificio. La

ubicación está determinada por: acceso solar y control solar. La envolvente térmica en cambio está determinada por: el factor de forma (compacidad) del edificio, la orientación y el porcentaje de fachada vidriada.

En invierno la demanda está definida por las pérdidas menos las ganancias:

- Hay que limitar las pérdidas (aislamiento).
- Hay que promover las ganancias (orientación ventanas, inercias) con elementos de captación directa como aperturas y lucernarios y elementos de captación indirecta como muros y cubiertas de alta inercia o de agua.

En verano la demanda está definida por las ganancias menos las pérdidas:

- Hay que limitar las ganancias (control solar, modulación, cargas internas)
- Edificios con un grado de soterramiento minimizan la exposición solar favoreciendo sombras y humedad.
- Los colores claros son menos absorbentes.
- Hay que promover las pérdidas (ventilación, free-cooling).

Aislamiento: minimizan las pérdidas térmicas de los diferentes sistemas del edificio (elementos constructivos e instalaciones).

- Optimizar el aislamiento térmico mediante capas de materiales aislantes y topologías constructivas adecuadas:
- Cubiertas: ventiladas y enjardinadas.
- Fachadas y vacíos: mejoras entre un 10% y un 20% en los valores de la transmitancia U del CTE.

Los puntos de la envolvente térmica que conlleve aislar de manera más importante, para estar más expuestos, son:

- La cubierta.
- La fachada Norte y / o el lado más expuesto al viento.
- Los vacíos (vidrios bajo emisivos y carpinterías con rotura de puente térmico).
- Perímetro de la solera.

Masa térmica: la inercia térmica de un cerramiento se usa con el objetivo de conservar la temperatura del interior de los locales habitables más estables a lo largo del día, mediante cerramientos de grande masa.

- Un uso adecuado de esta propiedad puede evitar el uso de sistemas artificiales de climatización interior.

- Las superficies de colores medios u oscuros favorecen ese fenómeno.
- En invierno la masa térmica del edificio almacena el calor solar durante el día para liberarlo de este modo en el interior por la noche.
- Durante el verano, realiza la misma función con la diferencia que la calor que se almacena durante el día es de la propia vivienda (manteniéndola así fresca) y la libera por la noche, evacuándola mediante la ventilación.

7. Marco legal

En el sector de la construcción, desde 1979, hasta hoy en día se siguen aprobando una serie de condiciones, directivas y reglamentos tanto a nivel local como internacional que pretenden guiar hacia un futuro de la edificación sostenible.

- En 1979 se aprueba NBE (Norma Básica de Edificación) sobre Condiciones Térmicas en los Edificios (España), cuyo objetivo es establecer las mejores prestaciones energéticas exigibles a éstos.
- En 1987 se aprueba la Norma Reglamentaria de Edificación NRE-AT-87 de ámbito catalán. Cuyo objetivo era actualizar las exigencias a la realidad constructiva.
- En 1988 se ratifica la Directiva Europea 89/106/CE sobre los productos de construcción. Ésta exige que las obras de construcción y las instalaciones de calefacción, refrigeración y ventilación sean diseñadas de tal forma que la cantidad de energía necesaria para su utilización sea reducida, teniendo en cuenta las condiciones climáticas del lugar y los ocupantes.
- En 2002 se aprueba la Directiva Europea 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios. El fomento de la eficiencia energética constituye una parte importante del conjunto de políticas y medidas necesarias.
- En 2006, a partir de la Directiva 2002/91/CE, el RD 314/2006 aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE) en España. De una aplicación en nuevas edificaciones y en grandes rehabilitaciones de edificios existentes. Este documento pretende acotar el elevado consumo energético de ciertas construcciones, centrando sus esfuerzos en la envolvente edificatoria y el abastecimiento de agua caliente sanitaria. Las exigencias energéticas que se derivan de la aplicación de este código se calcula que pueden suponer un ahorro de energía de entre un 30 y un 40% y una reducción de emisiones de CO₂ de entre un 30 y un 55%. En los siguientes capítulos se hará un acercamiento más detallado al Documento Básico, en especial al capítulo HE1.
- En 2007 se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) (España).
- En 2009 se aprueba la Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.

- En 2010 se reforma de la Directiva 2002/91/CE sobre Eficiencia Energética en Edificios que da lugar a la Directiva 2010/31/UE. Los nuevos edificios públicos que se construyan en la UE a partir de 2019 deberán ser de “*zero-emission buildings*”(consumo anual de energía igual o menor que la producción energética procedente de fuentes renovables situadas en el edificio). Este criterio será de aplicación también a los edificios privados a partir de 2021. Esta directiva impone la certificación energética del edificio, que valora su eficiencia térmica teniendo en cuenta aspectos como el grado de aislamiento o las instalaciones de producción de energía. En este certificado, y mediante una etiqueta de eficiencia energética, se asigna a cada edificio una Clase Energética de eficiencia, que varía desde la clase A (más eficientes), a la clase G (menos eficientes).
- También cabe mencionar la famosa apuesta europea 20/20/20 que consiste en conseguir un 20% de ahorro energético y una reducción del 20% de las emisiones de CO₂ para 2020. Este objetivo pretende alcanzarse a través de, la Directiva 2009/28/CE y la Directiva 2010/31/UE mencionadas anteriormente. ^[4]
- En 2012 se aprueba la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE. La nueva Directiva de Eficiencia Energética surge en un marco en el que se constata que la Unión Europea no va a alcanzar el objetivo de aumentar en un 20% la eficiencia energética en 2020. En este contexto ha sido necesario actualizar el marco legal de la Unión en materia de eficiencia energética, creando un marco común, mediante una Directiva que no sólo refuerce dicho objetivo, sino que también favorezca que las nuevas mejoras de eficiencia energética vayan más allá del 2020.

7.1. Normativas Básicas de Edificación

7.1.1. Exigencias de la Normativa Básica de Edificación de 1979 y 1987

Según el artículo 5º “Coeficiente de transmisión térmica U de los cerramientos” del NBE-CT-79 los valores de los coeficientes útiles de transmisión térmica de los cerramientos, excluidos los huecos, no han de ser superiores a los señalados en la Tabla 1, dados en función del tipo de cerramiento y de la zona climática donde esté ubicado el edificio, según

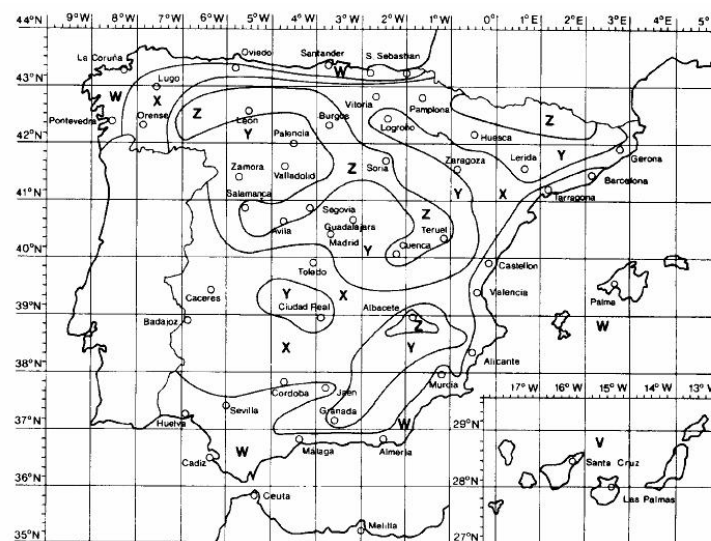
el Mapa 1 de zonificación climática.

U_{LIM} [W/m ² K]	Zona climática según el Mapa 1				
Tipo de cerramiento	V y W	X	Y	Z	
Cerramiento exterior	Cubiertas	1,4	1,2	0,9	0,7

Tabla 1. Transmitancias térmicas límite según la distribución de las zonas climáticas de España.

Fuente: NBE-CT-79

Por lo tanto, a Barcelona [B-W] le correspondería $U_{LIM}=1,4$ W/m²K [5].



Mapa 1. Mapa de las zonas climáticas de España. Fuente: NBE-CT-79

7.1.2. Código Técnico de la Edificación

Tal como se ha mencionado previamente en el capítulo *Marco Legal*, la transposición de la Directiva Europea 2002/91/CE de mejora de la eficiencia energética de los edificios a España, se plantea mediante el Código Técnico de la Edificación (CTE) que regula los parámetros constructivos mediante el Documento Básico HE-Ahorro de Energía, dividido en 6 capítulos.

- HE0 – Limitación del Consumo Energético
- HE1 – Limitación Demanda Energética
- HE2 – Rendimiento de las instalaciones térmicas (RITE)
- HE3 – Eficiencia energética lucernario interior

- HE4 – Obligación instalar placas solares para ACS
- HE5 – Obligación instalar placas solares fotovoltaicas.

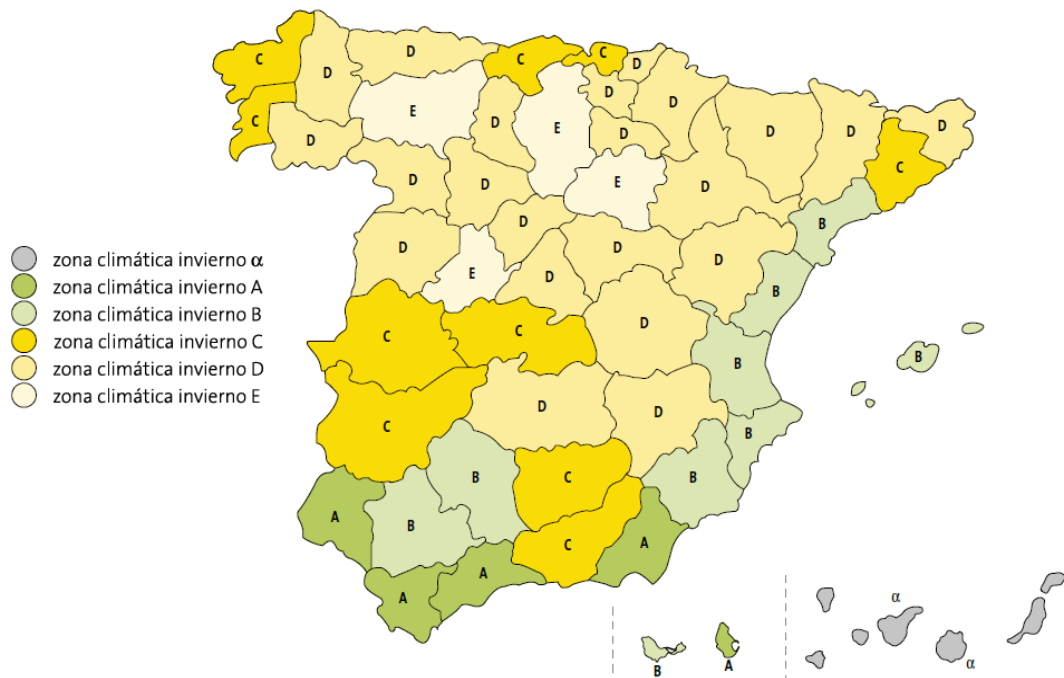
Este Documento Básico (DB) tiene por objetivo establecer las reglas y procedimientos que permitan cumplir el requisito básico de ahorro de energía. Las secciones se corresponden con las exigencias básicas HE1 a HE5, y la sección HE0 que se relaciona con varias de las anteriores. La correcta aplicación de cada sección supone el cumplimiento de la exigencia básica correspondiente. Por lo consiguiente, la correcta aplicación del conjunto del DB supone que se satisface el requisito básico "Ahorro de energía".

Se trata de conseguir pues, un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovables, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

La limitación de la demanda energética de HE1 dice lo siguiente: "Los edificios tendrán que disponer de una envolvente de características que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos."

7.1.3. Exigencias del DB-HE1 en transmitancia térmica

El diseño de la cubierta implica el control de las pérdidas y ganancias de calor a través de su superficie, amortiguando los efectos de las temperaturas extremas y disminuyendo el consumo de energía de distintas clases, necesario para conseguir una climatización adecuada. Actualmente el HE1 marca tres valores máximos de la transmitancia térmica U de las cubiertas que se ven reflejadas en función de la zona climática donde se ubique el edificio.



Mapa 2. Mapa de las zonas climáticas de España. Fuente: CTE-HE1, 2013

Por lo tanto, Barcelona queda en la zona C2 [6].

El valor más alto (indicado en la *Tabla 2*) representa la cuantificación de la exigencia de limitación de la demanda energética del edificio. Es decir, la transmitancia térmica máxima de la envolvente térmica

U_{LIM} [W/m ² K]		Zona climática según el Mapa 2					
Tipo de cerramiento		α	A	B	C	D	E
Cerramiento exterior	Cubiertas	1,2	0,8	0,65	0,5	0,4	0,35

Tabla 2. Transmitancias térmicas límite según la distribución de las zonas climáticas en España.

Fuente: CTE-HE1, 2013.

Por otro lado, para cumplir las exigencias de limitación de demanda, el CTE proporciona los parámetros de transmitancia de la envolvente de un edificio de referencia. Éste, se define con la misma forma, tamaño, orientación, zonificación interior. Se establece que la transmitancia promedio de la cubierta, incluyendo zonas habitables y no habitables.

U_{REF} [W/m ² K]	Zona climática											
Tipo de cerramiento	A3	A4	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	E1
Cerramiento exterior: Cubiertas	0,5		0,45		0,41				0,38			0,35

Tabla 3. Valores máximos de transmitancia de edificio de referencia. Fuente: CTE-HE1, 2013

Por último, están los valores orientativos de los parámetros característicos de la envolvente térmica. Éstos, son de utilidad para el pre-dimensionamiento de la solución constructiva. Sin embargo, el uso de la solución constructiva con los parámetros iguales a los ofrecidos por el CTE no garantiza el cumplimiento de la exigencia de la limitación de la demanda, dado a que ésta no incluye todos los elementos constructivos de la residencia privada en su conjunto. No obstante, al menos debería conducir a soluciones próximas.

U_{PRED} [W/m ² K]	Zona climática					
Tipo de cerramiento	α	A	B	C	D	E
Cerramiento exterior Cubiertas	0,5	0,47	0,33	0,23	0,22	0,19

Tabla 4. Valores de pre-dimensionamiento de la envolvente térmica.

Fuente: CTE-HE1, 2013

7.1.4. Exigencias del DB-HE1 en condensación superficial e intersticial

La comprobación de las condensaciones, superficiales e intersticiales, consistirá en realizar un análisis del factor de temperaturas superficiales y la distribución de la presión de vapor de saturación de todas las soluciones constructivas que se van a estudiar. A diferencia de la transmitancia térmica, no existen normas ni reglas que recomienden un factor de temperatura superficial o presión de saturación, dado que el fenómeno de la condensación no es gradual. Es decir, se produce condensación acumulada o no se produce. Y lo que se intentará buscar siempre es que no se produzca.

Mes	Enero	Mayo	Septiembre
T [°C]	8,8	16	21
HR [%]	73	72	74
Mes	Febrero	Junio	Octubre
T [°C]	9,5	19,7	17,1
HR [%]	70	70	74
Mes	Marzo	Julio	Noviembre
T [°C]	11,1	22,9	12,5
HR [%]	70	69	74
Mes	Abril	Agosto	Diciembre
T [°C]	12,8	23	9,6
HR [%]	70	72	71

Tabla 5. Datos climáticos mensuales medios para Barcelona.

Fuente: CTE-DA-DB-HE/2, 2013

Zona climática de invierno						
Categoría del espacio	α	A	B	C	D	E
Clase de higrometría 5	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
Clase de higrometría 4	0,56	0,66	0,66	0,69	0,75	0,78
Clase de higrometría 3 o inferior	0,42	0,5	0,52	0,56	0,61	0,64

Tabla 6. Factor de temperatura de la superficie interior mínimo $f_{Rsi,min}$.

Fuente: CTE-DA-DB-HE/2, 2013

Para el caso del clima mediterráneo que estamos estudiando, es decir, Barcelona, al igual que con la transmitancia térmica, correspondería a la zona climática C que implica la clase de higrometría 3 o inferior [7].

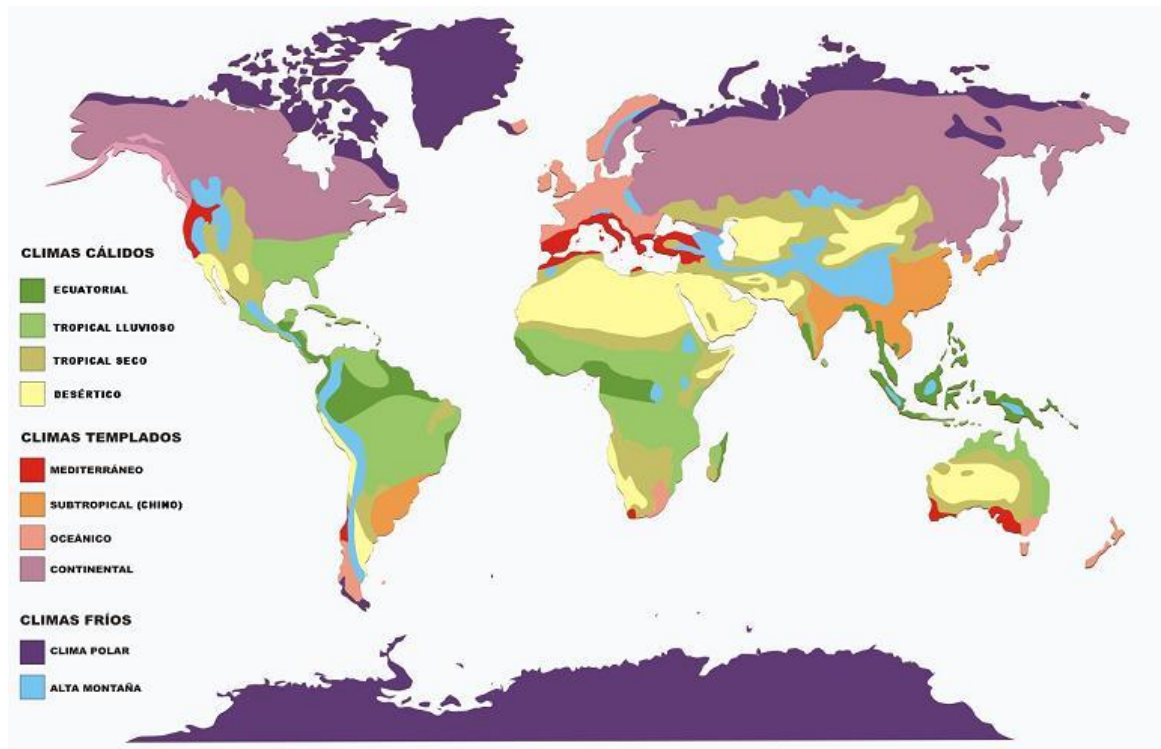
8. Influencia del clima mediterráneo en la vivienda

La relación entre el clima y la construcción ha sido siempre íntima, estableciéndose una dependencia de los materiales, las técnicas, los sistemas constructivos y el diseño de los edificios, con el clima del lugar. La “arquitectura popular” representa la adecuación entre el clima, las necesidades humanas y la construcción sostenible. Ésta, aparece en todo el mundo y en todas partes se adapta al lugar y a su respectiva climatología y usa los recursos naturales a su disposición.

En este apartado se plantea la influencia del clima mediterráneo en la edificación. Su repercusión en el uso de los cerramientos tradicionales y convencionales de las viviendas, tales como las cubiertas y fachadas. Actualmente la península Ibérica dispone de una amplia variedad de las regiones climáticas, Iberia atlántica (semi-marítima), continental (atenuada y extremada), mediterránea (noreste, levante y sudeste) e Iberia verde que correspondería al clima europeo occidental ^[8]. Pero como se ha mencionado anteriormente, y para precisar más, la zona escogida corresponderá a la costa catalana y valenciana.

Dentro de los diferentes climas que conforman el mosaico climático de la Tierra, el clima mediterráneo se podría calificar de extraño. Este adjetivo se debe por un lado a que es un clima poco extendido, que sólo se presenta en zonas muy determinadas del planeta. Aunque es evidente que en un principio sirve para designar el clima propio de la cuenca mediterránea, existen otros lugares en el mundo que tienen las mismas características climáticas y que por tanto se consideran que tienen clima mediterráneo. Estas zonas son: Chile central, la provincia sudafricana de El Cabo, zonas costeras del estado de California y el suroeste de Australia. Atendiendo a esta distribución, podemos generalizar diciendo que el dominio mediterráneo se localiza al oeste de los continentes, entre los paralelos 30º y 45º.

Por otro lado, posee una característica única que no se repite en ningún otro tipo de clima y es la sequedad del verano. En la mayoría de los climas, la época más lluviosa coincide con la más cálida, ya que por un lado el aire cálido es capaz de contener mayor humedad que el aire frío y por tanto mayor cantidad de agua precipitable; y por otro lado, el fuerte calor estival es capaz de poner en funcionamiento los ascensos de aire por convección, ya que el aire en contacto con la superficie recalentada, se calienta, disminuye su densidad y asciende. ^[9]



Mapa 3. Distribución de los climas en la Tierra. Fuente: <http://eltiempo.lasprovincias.es/articulos-divulgacion/clima-mediterraneo>

8.1. Factores climáticos y parámetros medioambientales

La combinación de distintos elementos, parámetros y factores determinantes da lugar al clima de una determinada zona. El conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan la zona climática queda determinada por los llamados factores climáticos. Estos factores son características propias de la zona y por lo tanto la definen dando lugar a los elementos climáticos más evidentes, como la temperatura, la humedad, la pluviosidad, la radiación, etc. [10]

Barcelonés: Media anual		
Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	HR (%)
18,2 °	625,4	65,2

Tabla 7. Medias anuales de los valores climáticos para Barcelonés. Fuente: <http://www.idescat.cat/>

Observando la tabla anterior se puede ver que realmente se trata de una zona cálida y seca, sin nevadas ni precipitaciones elevadas.

8.1.1. Del clima a la cubierta

Si en algo se caracteriza la construcción mediterránea es en la búsqueda del confort en verano, caluroso y húmedo. Tradicionalmente las soluciones a este problema han ido por dos caminos; espesor del cerramiento y cámara de aire ventilada. La primera solución, imperfecta, retrasa la radiación solar gracias a la inercia del cerramiento (su masa), aplazándola hasta las horas que la hagan más soportable. Por otro lado la segunda, mejor que la anterior, permite evacuar rápidamente esa energía aportada por la radiación mediante el desplazamiento del aire caliente, que se ve substituido por uno más frío y por lo tanto más denso. Provocando, así, una continua renovación de aire y con ello más confort. Este fenómeno buscado en las golfas de las azoteas tradicionales, es el que ha condicionado las soluciones constructivas en esta región.

La solución más natural y sencilla, sin lugar a dudas es la cubierta inclinada. Su geometría expresa su propio funcionamiento y facilita bajar las aguas fuera de la planta. Pero tiene el grave inconveniente, para los países de climas cálidos, de inutilizar el plano superior del edificio. En cambio, como resuelve bien el problema fundamental, evacuar cuantos antes mejor el agua de la lluvia y la nieve que recibe, es tradicionalmente adaptada por todos los países de clima lluvioso donde el interés que pudiera ofrecer la utilización de la planta superior del edificio viene superado por el que ofrece un desván aireado y a cubierto de la lluvia. En los países meridionales, en cambio, de lluvias menos frecuentes y en los cuales, por esta misma razón el interés del plano superior del edificio aumenta, se ha insistido en la cubierta azotea, habitual en el clima mediterráneo, y que es causa de que las ciudades sureñas aparezcan a los ojos habituados a las norteñas como conjuntos de construcciones sin terminar.

El sistema de azoteas tiene su mejor aplicación en climas secos y templados, como lo es el de casi toda España. La cubierta plana, la solución más cómoda, es útil en algunos edificios donde la transividad de la azotea es esencial. Sin embargo, no debe olvidarse que ésta, tiene más problemas de durabilidad que la inclinada y que en caso de fallo su detección y reparación es compleja. En definitiva, desde el punto de vista de funcionalidad, la cubierta inclinada siempre es mejor solución, por lo tanto parece razonable considerar a la cubierta plana como solución alternativa a la inclinada, pero dado que por razones de uso, tradición o composición la cubierta plana no ha dejado de difundirse y es hoy la solución más habitual en los edificios de Cataluña, Valencia, Baleares y Andalucía.

9. Soluciones de sistemas constructivos

Anteriormente, se ha podido ver de qué forma el clima ha influido en el sistema constructivo catalán. Por cuestiones climatológicas y tradicionales, la cubierta plana ha prevalecido sobre todas las demás, y ahora toca profundizar un poco más sobre qué soluciones dio este sistema constructivo. Una de estas soluciones es la cubierta transitable, que aparece sobre todo en la construcción urbana, dada la necesidad de recuperar el plano de la cubierta para usos que la densidad edificada no permite satisfacer en el espacio que rodea la casa, tal como ocurría en la construcción rural o en ciudades de edificación menos densa. Así pues, de todas las soluciones constructivas posibles, se plantearán solamente aquellas que fueron y siguen siendo tradicionales en Cataluña. Dichas soluciones son las cubiertas planas transitables frías y/o calientes.

Antes de empezar el análisis de las soluciones conviene definir algunos conceptos, comenzando por el significado de cubierta plana. Pese al nombre, la cubierta plana, realmente no lo es ya que disponen de una pendiente entre 1 y 5% (siendo recomendado un 2 o 3% ^[11] para las soluciones más modernas) incluso en algunos casos, dependiendo de los autores y de la época, se admiten hasta 8 y 10% ^[12] de pendiente. De lo contrario la cubierta no podría realizar su función principal; evacuar el agua de la lluvia. Es cierto también que desde hace tiempo se lleva hablando de cubiertas con pendiente cero, pero no es el tema de este proyecto. A continuación toca definir la diferencia entre una cubierta fría y una caliente, mencionados en el párrafo anterior. Se entiende como una cubierta fría aquella que dispone de una cámara de aire, ventilada o no, entre el forjado y el exterior y por lo consiguiente, como una cubierta caliente aquella que no dispone de ninguna cámara de aire. Por último queda definir el concepto de transitabilidad, una solución transitable es aquella que permite el aprovechamiento de la azotea por los inquilinos de la vivienda, mientras que la no transitable es exclusivamente para el mantenimiento.

Para poder abordar este estudio genéricamente, se ha de especificar una serie de criterios e hipótesis que se tomarán a lo largo del proyecto. Primero de todo, el criterio de selección de materiales. Dada que la intención es generalizar, habrá que seleccionar aquellos materiales que eran de uso más común y para ello se procederá de la siguiente forma:

1. Se intentará buscar información exacta en libros, estudios, etc
2. Se intentará buscar unos valores mínimos de las características de los materiales en las normativas, UNE...
3. Se escogerá la conductividad, espesor, densidad, máxima permitida de las existentes en las tablas de los materiales en las normativas de edificación, según la época de la cubierta.
4. Se intentará escoger siempre (evolutivamente) el mismo material, en los casos que sea posible, para de este modo ir observando la misma evolución de los materiales.
5. Por último, cuando sea imposible averiguar información necesaria, se consultará a los profesionales del banco BEDEC.

Por otro lado, se toma como hipótesis que todas las cámaras de aire son ligeramente ventiladas y de espesor constante, excepto de las azoteas catalanas.

9.1. Soluciones tradicionales

9.1.1. Azotea catalana

La primera cubierta que se analizará en este proyecto, la más arcaica, es la azotea catalana o cubierta a la catalana tradicional a principios del siglo XX. Es una transposición de la cubierta de la teja que solo es válida para climas poco lluviosos y para cubiertas de pequeñas dimensiones. Es la solución más simple y por lo tanto la menos eficiente. Consiste básicamente en formar una solera, una pieza tabicada de poca pendiente formada en general por tres capas de rasilla sujeta con tabiquillos conejeros. Una primera capa, un doblado de rompejunta y una tercera en diagonal, cubiertos luego por un pavimento, que cubre totalmente el edificio que acompaña las aguas hasta fuera de la proyección de la planta. Entre el forjado y la solera se forma una cámara de aire, más conocida como desván o "golfas". Para este tipo de solución es necesario que sus dimensiones no sean excesivas y que el clima sea benigno, sin grandes diferencias de temperatura. La permeabilidad no es muy elevada por lo que será necesario dar al conjunto una pendiente notable, de 8 al 10% y ventilar su cara inferior ^[13].

Las azoteas catalanas no disponían ni de aislantes ni de impermeabilizantes, dado por la escasez de los materiales en la postguerra por una parte y por otra la no aparición del betún asfáltico hasta los años 60.

Dicho sistema constructivo venía siendo constituido por; una cámara de aire, de una media de 50 y 60 cm de espesor, formada con tabiquillos conejeros situado directamente sobre el forjado, también eran los responsables de la formación de pendiente ^[14]. Dado que el espesor superaba los 150 mm, se le atribuye una resistencia térmica $R=0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$ ^[15]. A continuación se extendía una primera capa de rasilla cerámica, de 2 cm de espesor, fijando con enlucido de yeso dado su rápida capacidad de secado. Posteriori, se extienden dos o tres capas de rasilla cerámica juntándolas, esta vez, con mortero dada su mayor fuerza resistiva. Por último se extendía el acabado, tradicionalmente de solado de baldosín catalán o también de ladrillo prensado.

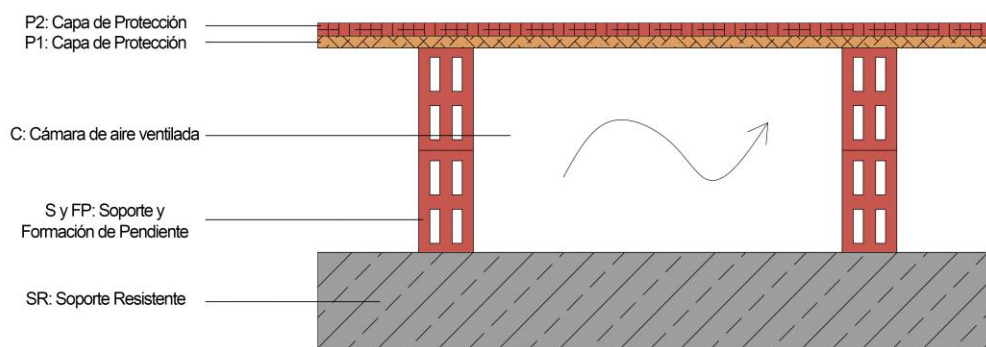


Imagen 3. Representación de la Azotea catalana.

Cubierta: Azotea catalana							
Abreviatura: AC1							
Elemento compositivo	Material	ρ	δ	e	λ	R_t	U
		[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[cm]	[W/mK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]
P1: Capa de protección	Baldosín catalán	2000	40	2	1,05	0,01904	52,5
P2: Capa de protección	Rasilla cerámica	2000	80	4	1,05	0,03809	26,25
C: Cámara ventilada	Aire	0	0	55	0	0,16	6,25
TOTAL			120	61		0,2171	4,6052

Tabla 8. Desglose y transmitancias de los elementos de la azotea catalana.

Fuente: NBE-CT-79

9.1.2. Cubierta plana transitable pre-convencional o emergente en los 60

En los años posteriores, empiezan a aparecer todo un seguido de nuevas soluciones. Por lo contrario de las cubiertas catalanas, las cubiertas emergentes sí disponían de aislantes y de tela impermeabilizante. El desván, cuya eficacia como aislante térmico muy a menudo no compensa térmicamente, como lo es el aglomerado de corcho, lana de vidrio, y especialmente el hormigón celular sin áridos (con una conductividad de 0,09 W/mK), éste además es el responsable de formar pendiente con un espesor de media de unos 10 cm. Sobre esta sustancia aislante se extiende un impermeabilizante continuo y elástico, en tal forma, que recubre toda la superficie de la azotea. Ya por esa década, la tela impermeable irrumpía como un elemento imprescindible de la solución constructiva. Dichas telas, mayoritariamente láminas asfálticas bituminosas, habían remplazado de este modo a las planchas de plomo, más pesadas y fácilmente agrietables, utilizadas previamente.

Se hace preciso interponer un grueso de arena fina, de 4 a 5 cm de espesor, o un grueso de 2 a 3 cm de mortero de cal, entre la tela impermeabilizante y el pavimento, que facilita la colocación de éste, y protege al mismo tiempo la tela. Se comprende que tales azoteas admiten como pavimento cualquier material que sea capaz de resistir la acción de la intemperie. Los de tierra cocida (rasilla cortada, baldosín de alfarero, tobas, etc.) de unos 2 cm de espesor, así como las baldosas de hormigón constituyen buenos materiales ^[16].

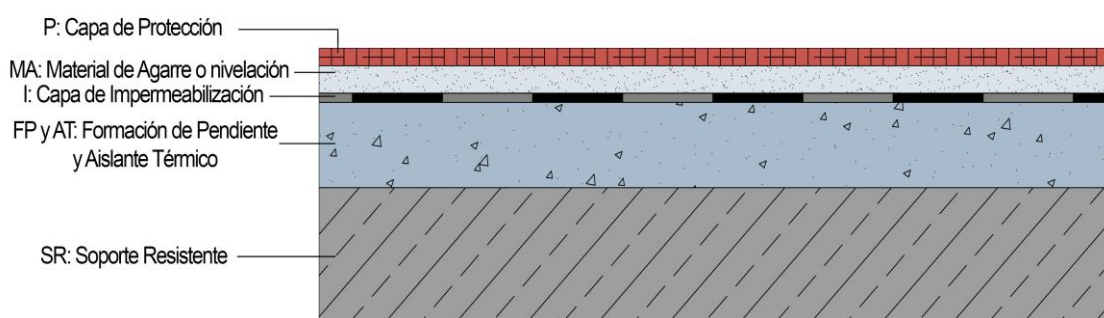


Imagen 4. Representación de la cubierta plana emergente en los años 60.

Cubierta: Emergente en los 60							
Abreviatura: E60							
Elemento compositivo	Material	ρ	δ	e	λ	R_t	U
		[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[cm]	[W/mK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]
P: Capa de protección	Baldosín catalán	2000	40	2	1,05	0,01904	52,5
MA: Material de nivelación	Mortero de cal y bastardos	1600	48	3	0,87	0,03448	29
I: Lamina impermeabilizante	Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	1,44	4,8	0,3	0,19	0,01578	63,333
FP y AT: Formación de pendientes	Hormigón celular sin áridos	305	30,5	10	0,09	1,111	0,9
TOTAL			123,3	15,3		1,1804	0,8471

Tabla 9. Desglose y transmitancias de los elementos de la emergente en los años 60.

Fuente: NBE-CT-79

9.1.3. Cubierta plana transitable convencional sin cámara de aire

La cubierta convencional, que debe su nombre al orden establecido en la formación de los materiales, es una solución típica que prevalece hasta hoy en día. Se podría decir que la diferencia entre la emergente en los años anteriores (visto en el capítulo anterior) y la cubierta convencional viene representada por la adaptación de la primera a la aparición de nuevos materiales en el sector. Por ejemplo, el hormigón celular ya no desempeña la doble función de formador de pendiente y aislante. La aparición de nuevos aislantes, permiten obtener una mejor resistividad térmica. Además, para la formación de pendientes se dejó de usar el hormigón celular que fue sustituido por hormigón en masa con grava normal, de una capacidad resistiva superior. Pese a los nuevos elementos, las dos soluciones fueron contemporáneas.

Dentro de las cubiertas planas, las cubiertas calientes, sin cámara de aire ventilada, eran las más frecuentes. Dependiendo de la época de construcción y de la zona geográfica y climática se construían con o sin lámina impermeable. Un claro ejemplo de cubierta sin lamina impermeable era la “cubierta a la andaluza” actualmente en desuso.

Dicho sistema constructivo venía siendo constituido por; hormigón en masa con arcilla con grava normal, que podía ser con áridos ordinarios o vibrado, extendido sobre el forjado con un espesor de entre 5 y 6 cm de media. Lana mineral, con un grosor de 3 a 4 cm, y la lámina asfáltica bituminosa LBM-50/G, que se traduce a 4,8 Kg/m² y un espesor de 3 mm, hacían de aislante e impermeabilizante respectivamente [17]. Por último, se extendía una capa de enladrillado cerámico de 2 cm de espesor.

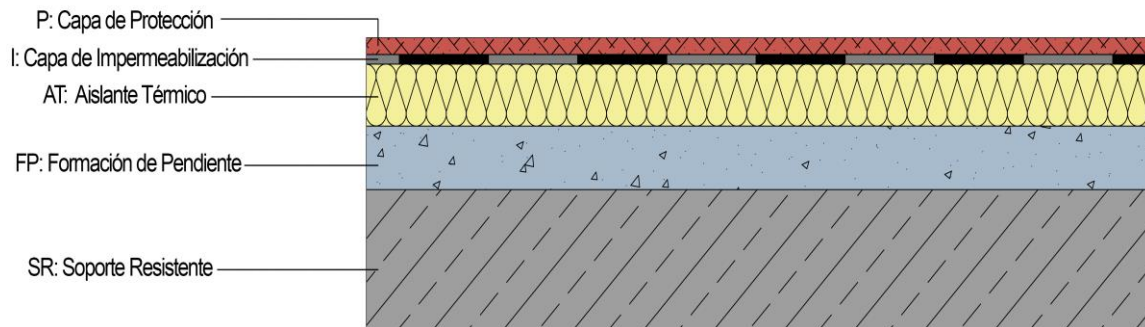


Imagen 5. Representación de la cubierta plana convencional sin cámara de aire I.

Cubierta: Plana Convencional Transitable Caliente							
Abreviatura: PCTC1							
Elemento compositivo	Material	ρ	δ	e	λ	R_t	U
		[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[cm]	[W/mK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]
P: Capa de protección	Rasilla cerámica	2000	40	2	1,05	0,01904	52,5
I: Lamina impermeabilizante	Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	1,44	4,8	0,3	0,19	0,01578	63,33
AT: Aislante térmico	Placa rígida de lana mineral de roca	50	3,5	7	0,042	1,666	0,6
FP: Formación de pendientes	Hormigón en masa con grava normal, vibrado	2400	144	6	1,63	0,0368	27,166
TOTAL			192,3	15,3		1,7383	0,5752

Tabla 10. Desglose y transmitancias de los elementos de la cubierta plana convencional sin cámara de aire I. Fuente: NBE-CT-79

9.1.4. Cubierta plana transitable invertida sin cámara de aire

Algo después de las cubiertas convencionales, gracias a los avances en el sector químico, surge una nueva modalidad de cubiertas planas transitables, la llamada cubierta invertida. En dicha cubierta, únicamente cambia el orden del aislante y del impermeable. A priori puede parecer un cambio insignificante, pero realmente representó un gran avance en la construcción de cubiertas. Puesto que anteriormente no existía ningún aislante con capacidad resistiva suficiente para estar a la intemperie o bajo el enladrillado, lo que acababan provocando la rotura del material. Dado este motivo, Benavent, en su obra “Como debo construir”, no propone ninguna solución en los casos que se dan las dichas roturas o fisuras ^[18].

Como se ha dicho anteriormente, la cubierta plana invertida fue toda una revolución, gracias en parte a la utilización del poliestireno extruido como aislante, con un espesor de entre 5 y 7 cm y una conductividad de 0,033 W/mK ^[19]. Sus características resistentes permitían mantener la tela impermeable alejada de las acciones solares y térmicas, a parte garantizando la impermeabilidad de la cubierta, ya que el agua discurre tanto por superficie, como a través de las juntas del aislante llegando al impermeabilizante y de ahí a los sumideros.

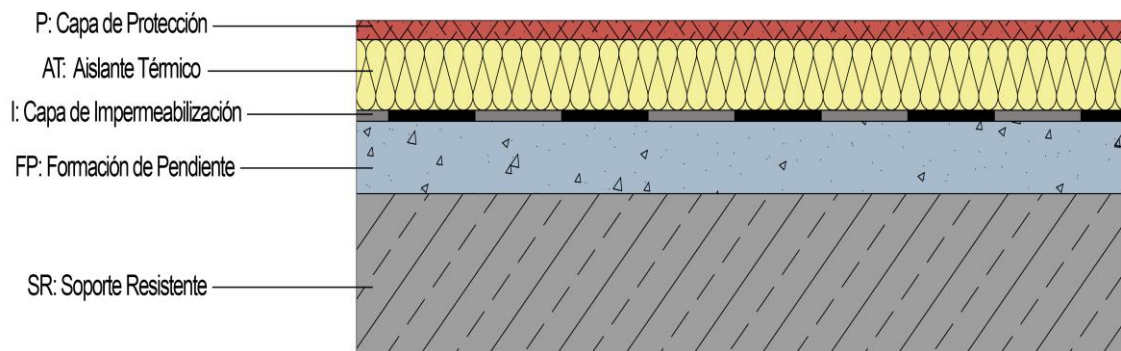


Imagen 6. Representación de la cubierta plana invertida sin cámara de aire I.

Se ha de destacar que, en todas estas cubiertas, en lugar de utilizar un solo grosor de membrana impermeable se han colocado dos para asegurar una mejor estanqueidad. En consecuencia, el doblado de la membrana mejorará la durabilidad de las cubiertas y se reducirán las anomalías constructivas.

Cubierta: Plana Invertida Transitable Caliente							
Abreviatura: PITC1							
Elemento compositivo	Material	ρ	δ	e	λ	R_t	U
		[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[cm]	[W/mK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]
P: Capa de protección	Rasilla cerámica	2000	40	2	1,05	0,01904	52,5
AT: Aislante térmico	Poliestireno extrusionado (CO ₂)	33	2,31	7	0,033	2,1212	0,4714
I: Lámina impermeabilizante	Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0,96	4,8	0,2	0,19	0,01052	95
FP: Formación de pendientes	Hormigón en masa con grava normal, vibrado	2400	144	6	1,63	0,0368	27,166
TOTAL			191,11	15,2		2,1876	0,4571

Tabla 10. Desglose y transmitancias de los elementos de la cubierta plana invertida sin cámara de aire I. Fuente: NBE-CT-79

9.2. Soluciones posteriores a 1979 y actuales

En cuanto a la evolución del diseño se puede tipificar hoy tres soluciones aceptables: la basada en la azotea catalana, la convencional mejorada y la cubierta invertida. La primera solo consiste en normalizar y adecuar a los materiales actuales la tradicional solera de azotea con el sistema de bateaguas. La segunda recoge la solución convencional y mejora la protección de las telas (que a veces solo se cubren con la rasilla) y los detalles perimetrales. Por fin, la más moderna, la cubierta invertida, se basa en la comercialización del poliestireno extrusionado ^[20] que puede colocarse sobre la lámina impermeable dándole una magnífica protección.

En los siguientes apartados, se verán los sistemas constructivos en los que ha desembocado la cubierta convencional e invertida. Dada la aparición de normas y

reglamentos que a partir del año 79 han regularizado tanto la transmisión de calor como la condensación, dichas cubiertas se han visto obligadas a adaptarse a los nuevos tiempos dando lugar a soluciones, como por ejemplo, cámaras de aire. A lo que se refiere a la azotea catalana y a la cubierta emergente en los 60 o pre-convencional, éstas no serán vistas. Dado que la primera se asemeja, sino es lo mismo, a la convencional con cámara de aire con una modernización de los materiales y la segunda porque fue substituida por la convencional. A nivel térmico e higrotérmico no presentarían ninguna novedad.

9.2.1. Cubierta plana transitable convencional con cámara de aire

La cubierta convencional fría, que hace su aparición sobre los años 80, no cambia excesivamente respecto la convencional caliente a lo que se refieren los materiales. En lo que sí presentó una innovación fue en la inserción de una cámara de aire con tabiques de ladrillo hueco. Mientras, directamente sobre el forjado se extendía el aislante, poliestireno extrusionado (5-7 cm, igual que las anteriores) ^[21]. A diferencia de la azotea catalana, el responsable de la formación de pendiente era un doble tablero de rasilla de 2 cm de espesor cada uno. Seguido de la lámina asfáltica LBM-50/G, de 1 mm de espesor ^[22], y de una capa de protección con solado de baldosín, tomado con mortero de cemento.

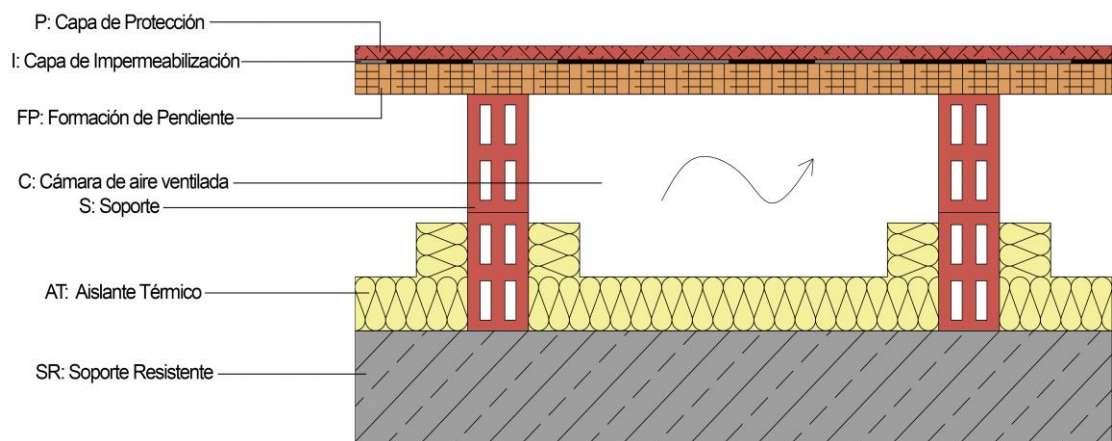


Imagen 7. Representación de la cubierta plana convencional con cámara de aire I.

Cubierta: Plana Convencional Transitable Fría							
Abreviatura: PCTF1							
Elemento compositivo	Material	ρ	δ	e	λ	R_t	U
		[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[cm]	[W/mK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]
P: Capa de protección	Solado de baldosín	2000	40	2	1	0,02	50
I: Lamina impermeabilizante	Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0,48	4,8	0,1	0,19	0,00526	190
FP: Formación de pendientes	Doble tablero de rasilla cerámica	2000	80	4	1	0,04	25
C: Cámara ventilada	Aire	0	0	15	0	0,135	7,4074
AT: Aislante térmico	Poliestireno extrusionado (CO ₂)	33	2,31	7	0,033	2,1212	0,47142
TOTAL			127,11	28,1		2,3214	0,4307

Tabla 11. Desglose y transmitancias de los elementos de la cubierta plana convencional con cámara de aire I. Fuente: Catálogo de Elementos constructivos del CTE., 2010.

9.3. Soluciones actuales

El proceso de especialización de los materiales ha llegado a un punto álgido. Los materiales tradicionales, y en general los materiales pesados, gruesos y con peores características, no pueden competir con los modernos especializados en aislamiento térmico. Los materiales ligeros, que albergan gran cantidad de aire en sus celdillas, entre sus fibras, etc. Las elevadas exigencias de la normativa han impuesto definitivamente el uso de materiales especiales para conseguir el aislamiento térmico y han consumado la diferenciación de la envolvente que asume esta función. Sí que es cierto pero, que en el tema de impermeabilización, el material más común (lámina de betún asfáltico) no ha experimentado grandes cambios ni ha sido sustituido por ningún otro.

9.3.1. Cubierta plana convencional e invertida sin cámara de aire

Hoy en día el dominio de la cubierta invertida por sobre de las planas ha sido posible porque es un caso de coincidencia entre calidad constructiva y economía. Las ventajas de durabilidad de la membrana dispuesta por debajo del aislante han extendido la utilización ^[23] aun necesitando un 10% más de aislante térmico que la convencional ^[24].

Dichos sistemas constructivos vienen siendo constituidos por; hormigón en masa con grava normal y áridos ligeros, de una densidad de 1700 o 1800 Kg/m³ [25], para la formación de pendientes de unos 5 cm de espesor tanto para las convencionales como invertidas. Sobre ese hormigón se extiende una finísima capa de polietileno de alta densidad, a cargo de una nueva función, propia de las soluciones modernas, barrera contra-vapor. Dicha barrera, es totalmente prescindible para las cubiertas invertidas. Debido a que el impermeable, normalmente, está situado en el punto caliente donde se produce la condensación y ya hace esta función. Es más, incluso en algunos casos, también es prescindible para las convencionales.

Mientras que en la convencional es de aplicación como aislante térmico la espuma rígida de poliuretano, proyectada con hidrofluorcarbono (HFC) y con muy buena resistencia térmica (conductividad igual a 0,024 W/mK), en la invertida es la espuma rígida de poliestireno extruido, también expandida con HFC. Otra novedad que se presenta es el uso de fieltro geotextil no tejido, como por ejemplo puede ser el fieltro de poliéster de 5 mm de una densidad de 50 Kg/m³ y una buena resistencia térmica para aislar tanto el aislante como la lámina impermeabilizante. A parte de evitar adherencias ha de ser también antipunzonante [26]. Por último se utiliza como material de agarre o nivelación mortero de cal de 1900 Kg/m³ sobre el que se extiende un solado fijo.

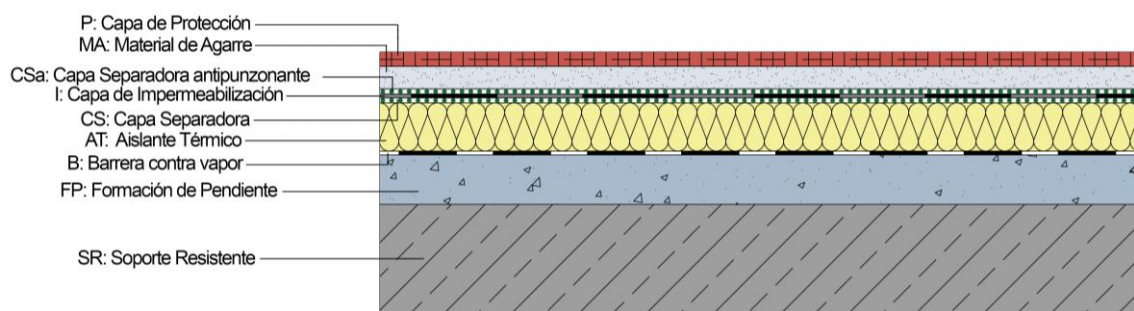


Imagen 8. Representación de la cubierta plana convencional sin cámara de aire II.

Cubierta: Plana Convencional Transitable Caliente							
Abreviatura: PCTC2							
Elemento compositivo	Material	ρ	δ	e	λ	R_t	U
		[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[cm]	[W/mK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]
P: Capa de protección	Solado fijo	2000	40	2	1	0,02	50
MA: Material de nivelación	Mortero de cal	1900	19	1	1,3	0,00769	130
CSa: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliester	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
I: Lámina impermeabilizante	Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0,48	4,8	0,1	0,23	0,00434	230
CS: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliester	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
AT: Aislante térmico	Espuma rígida de poliuretano (HFC)	70	4,9	7	0,024	2,9166	0,3428
B: Barrera contra vapor	Lámina de polietileno (HDPE)	980	0,49	0,05	0,5	0,001	1000
FP: Formación de pendientes	Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	1800	72	4	1,15	0,03478	28,75
TOTAL			141,69	15,15		3,2476	0,3079

Tabla 12. Desglose y transmitancias de los elementos de la cubierta plana convencional sin cámara de aire II.

Fuente: Catálogo de Elementos constructivos del CTE, 2010.

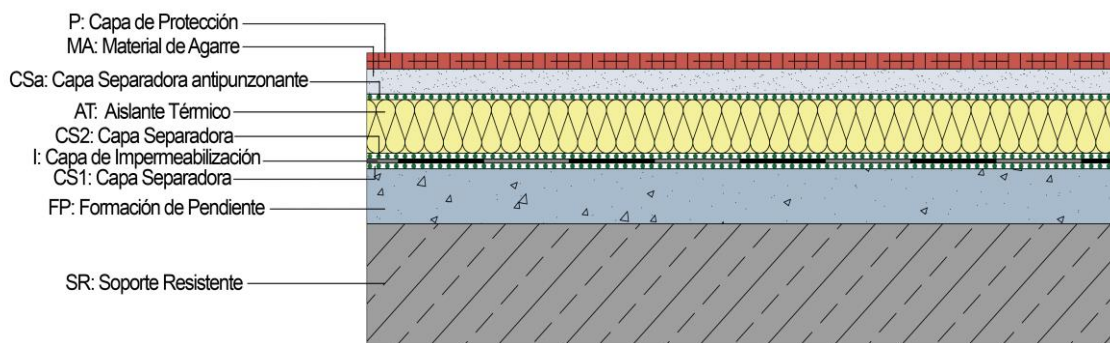


Imagen 9. Representación de la cubierta plana invertida sin cámara de aire II.

Cubierta: Plana Invertida Transitable Caliente							
Abreviatura: PITC2							
Elemento compositivo	Material	ρ	δ	e	λ	R_t	U
		[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[cm]	[W/mK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]
P: Capa de protección	Solado fijo	2000	40	2	1	0,02	50
MA: Material de nivelación	Mortero de cal	1900	19	1	1,3	0,00769	130
CSa: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliester	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
AT: Aislante térmico	Poliestireno extruido (XPS-HFC)	33	2,31	7	0,029	2,4137	0,4142
CS: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliester	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
I: Lámina impermeabilizante	Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0,48	4,8	0,1	0,23	0,00434	230
CS: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliester	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
FP: Formación de pendientes	Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	1800	72	4	1,15	0,03478	28,75
TOTAL			138,86	15,6		2,8753	0,3477

Tabla 13. Desglose y transmitancias de los elementos de la cubierta plana invertida sin cámara de aire II.

Fuente: Catálogo de Elementos constructivos del CTE, 2010.

9.3.2. Cubierta plana convencional e invertida con cámara de aire

Y al fin, las últimas soluciones constructivas que se verán en este análisis son las de solado flotante, es decir con cámara de aire. Evidentemente, como se ha marcado en la hipótesis inicial, se trata de cámaras ligeramente ventiladas. Éstas, prácticamente iguales a las de solado fijo. A parte de los materiales utilizados, lo que diferencia estas cubiertas frías de las vistas anteriormente, es la utilización de viguetas de hormigón pretensados de 15 cm ^[27] ^[28] de altura en vez de los tabiques. Como se verá más adelante esto tiene un impacto favorable en el tema de los residuos de construcción.

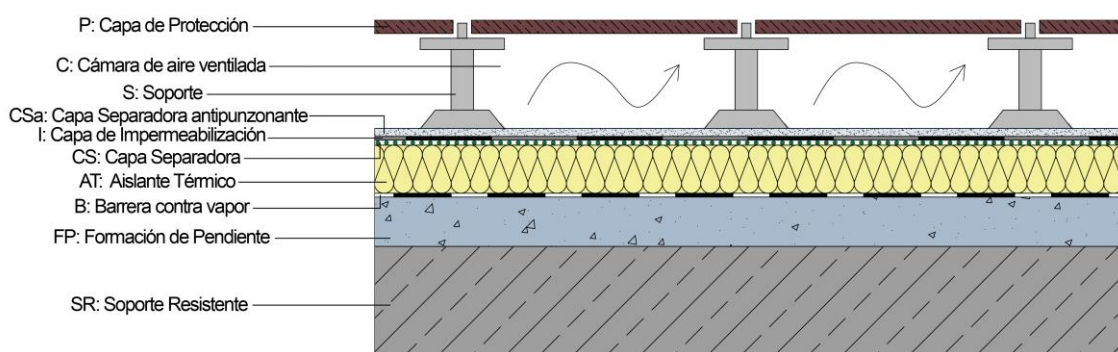


Imagen 10. Representación de la cubierta plana convencional con cámara de aire II.

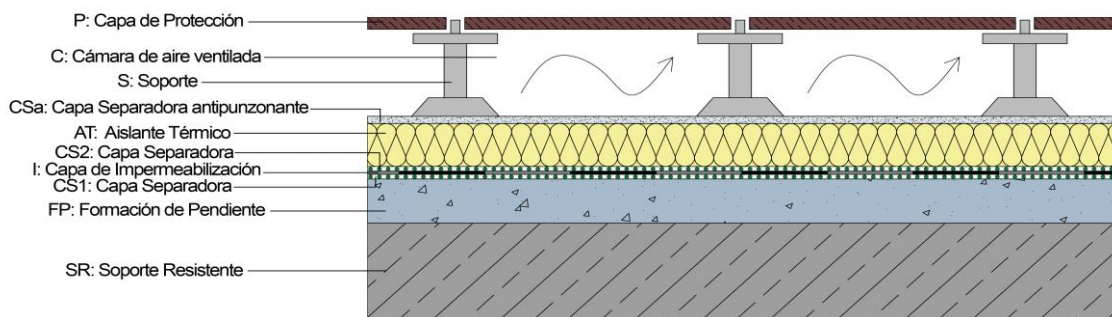


Imagen 11. Representación de la cubierta plana invertida con cámara de aire I.

Cubierta: Plana Convencional Transitable Fría							
Abreviatura: PCTF2							
Elemento compositivo	Material	ρ	δ	e	λ	R_t	U
		[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[cm]	[W/mK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]
P: Capa de protección	Solado fijo	2000	40	2	1	0,02	50
C: Cámara ventilada	Aire	0	0	15	0	0,135	7,4074
CSa: Capa separadora bajo protección	Mortero de cal	1600	16	1	0,8	0,0125	80
I: Lámina impermeabilizante	Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0,48	4,8	0,1	0,23	0,00434	230
CS: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliéster	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
AT: Aislante térmico	Espuma rígida de poliuretano (plancha HFC)	70	4,9	7	0,024	2,9166	0,3428
B: Barrera contra vapor	Lámina de polietileno (HDPE)	980	0,49	0,05	0,5	0,001	1000
FP: Formación de pendientes	Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	1800	72	4	1,15	0,03478	28,75
TOTAL			138,44	29,65		3,2558	0,3071

Tabla 14. Desglose y transmitancias de los elementos de la cubierta plana convencional con cámara de aire II.
Fuente: Catálogo de Elementos constructivos del CTE, 2010.

Cubierta: Plana Invertida Transitable Fría							
Abreviatura: PITF1							
Elemento compositivo	Material	ρ	δ	e	λ	R_t	U
		[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[cm]	[W/mK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]
P: Capa de protección	Solado fijo	2000	40	2	1	0,02	50
C: Cámara ventilada	Aire	0	0	15	0	0,135	7,4074
CSa: Capa separadora bajo protección	Mortero de cal	1600	16	1	0,8	0,0125	80
AT: Aislante térmico	Poliestireno extruido (XPS-HFC)	33	2,31	7	0,029	2,4137	0,4142
CS: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliester	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
I: Lámina impermeabilizante	Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0,48	4,8	0,1	0,23	0,0043	230
CS: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliester	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
FP: Formación de pendientes	Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	1800	72	4	1,15	0,03478	28,75
TOTAL			135,61	30,1		2,8835	0,3468

Tabla 15. Desglose y transmitancias de los elementos de la cubierta plana invertida con cámara de aire I.
Fuente: Catálogo de Elementos constructivos del CTE, 2010

Las soluciones con cámara de aire, se distinguen de las cubiertas calientes, no tanto por la diferencia de transmitancia térmica, como por el hecho de que mejoran el confort térmico en verano. Dado que en el Mediterráneo el principal enemigo son los veranos bochornosos, la refrigeración por ventilación es de gran ayuda. La cámara de aire cumple con dicha función, explicado con más detalle previamente en el capítulo 8.1.1 *Del clima a la cubierta*. Éste, es un aspecto en el que la transmitancia térmica se queda corta a la hora de explicarla, ya que depende de más factores y es necesario un estudio a más profundidad, más detallado, evaluando el comportamiento de los elementos de cada solución según la disposición horaria, cosa que queda fuera de este proyecto.

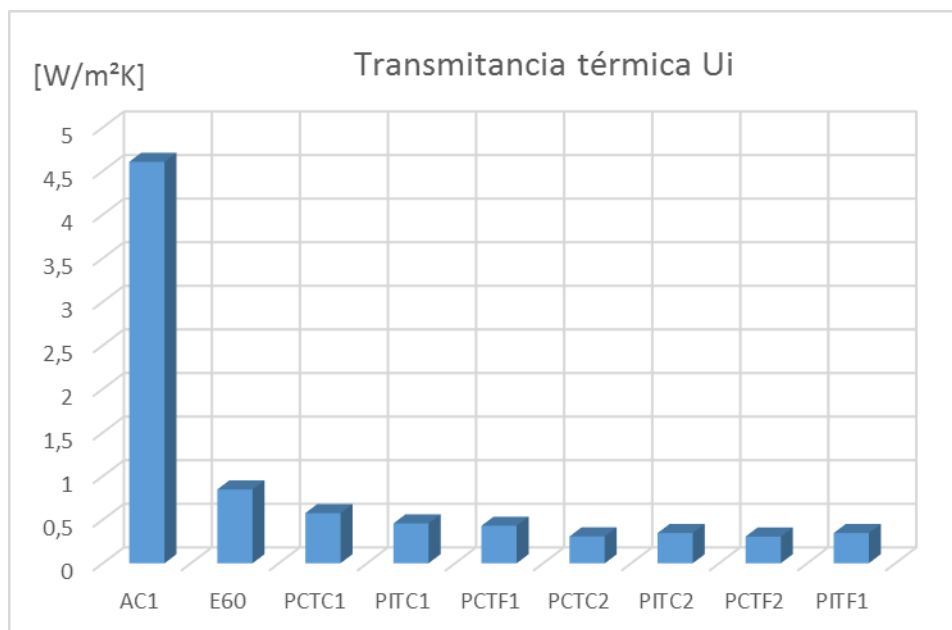
10. Análisis comparativo de los resultados térmicos e higrotérmicos

Llegados a este punto, ahora toca analizar los diferentes resultados obtenidos para cada solución. Se verán dos comparaciones, una de la transmitancia térmica y otra de la condensación.

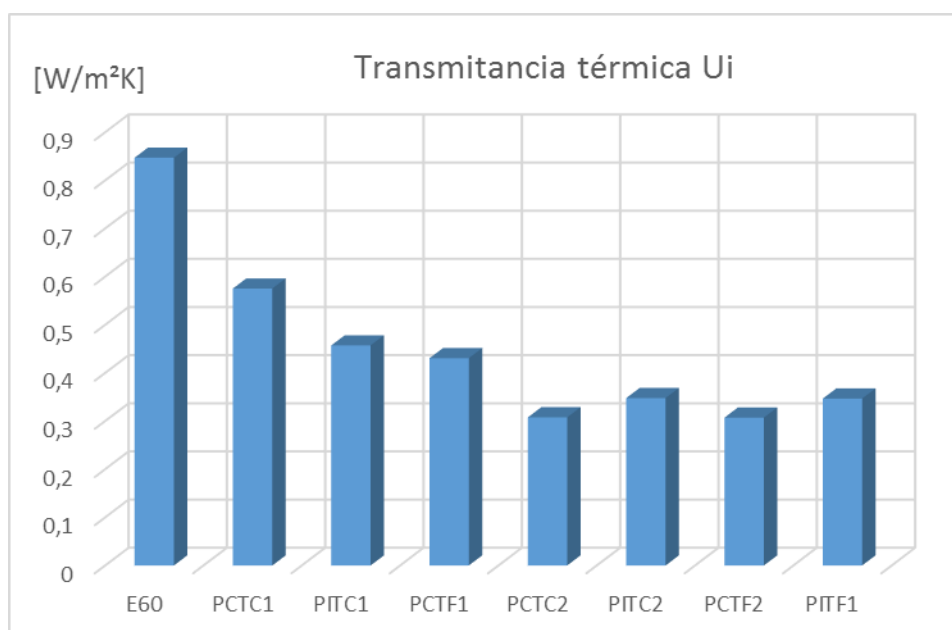
10.1. Comparación de los resultados de transmitancia térmica

		Norma Básica de Edificación					
Cubierta	U _i [W/m ² K]	NBE-CT-79	NRE-AT-87		CTE-DB-HE1		
		U _{LIM} [W/m ² K]	U _{LIM} [W/m ² K]	U _{REF} [W/m ² K]	U _{LIM} [W/m ² K]	U _{REF} [W/m ² K]	U _{PRED} [W/m ² K]
		1,4	1,39	0,46	0,5	0,41	0,23
AC1	4,60526	✗	✗	✗	✗	✗	✗
E60	0,84714	✓	✓	✗	✗	✗	✗
PCTC1	0,57527	✓	✓	✗	✗	✗	✗
PITC1	0,45712	✓	✓	✓	✓	✗	✗
PCTF1	0,43076	✓	✓	✓	✓	✗	✗
PCTC2	0,30791	✓	✓	✓	✓	✓	✗
PITC2	0,34778	✓	✓	✓	✓	✓	✗
PCTF2	0,30713	✓	✓	✓	✓	✓	✗
PITF1	0,34679	✓	✓	✓	✓	✓	✗

Tabla 16. Comparativa de las transmitancias obtenidas de cada solución con las normas reguladoras.
Fuente: NBE-CT-79, NRE-AT-87, CTE-DB-HE1 2013.



Gráfica 1. Representación de las transmitancias obtenidas de cada solución.



Gráfica 2. Representación de las transmitancias obtenidas de cada solución exceptuando AC1.

Analizando los resultados, se puede ver claramente como con una selección adecuada de los materiales, ya desde los años 60, se podían construir unas cubiertas, que aunque no verifiquen NRE-AT-87 ni CTE-DB-HE1, consiguen acercarse notablemente. Por ejemplo, PCTC1 y PITC1. Otro tema es, si realmente se haya llevado a la práctica. Vistos los casos

que se dan de edificios, de no más de 40 años, con húmedades y altísimas transmitancias pueden deberse a la intención de abaratar los costes de construcción utilizando materiales y elementos no adecuados. Tampoco es de extrañar que las envolventes propuestas por el CTE consigan cumplir con valor de la U más restrictivo, U_{PRED} del pre-dimensionamiento, dado que las opciones estudiadas son genéricas, utilizando los materiales más típicos. No se ha intentado diseñar una cubierta que la cumpla, dado que tampoco es de obligado cumplimiento.

Llama la atención de cómo, a medida que se aprueban nuevas normas y reglamentos de exigencia de transmitancia, las soluciones mejoran escalonadamente. Lo cual induce a pensar en que realmente, se dispone de las herramientas necesarias para conseguir acercarse cada vez más a la eficiencia total en el hogar.

Por último remarcar, que el hecho de que las cubiertas sean invertidas no implica que tengan mayor transmitancia que las convencionales. En los resultados es así debido a que se han intentado mantener los mismo materiales todo el estudio y evidentemente, algunos han ido mejorando y otros no. Es más, la invertida presenta múltiples ventajas, como por ejemplo la protección de la lámina de impermeabilización a roturas y dilataciones que pueden acabar en filtraciones de agua.

10.2. Comparación de los resultados de condensación

El estudio de la condensación superficial e intersticial se hizo mediante el software libre *eCondensa*, de *Aurea Consulting*, que realiza cálculos de condensaciones conforme con el nuevo CTE. Así pues, escogidos los materiales, descritos anteriormente, y fijadas las condiciones de cálculos, descritas en las tablas de más abajo, se ha obtenido para cada sistema constructivo los factores de temperatura de la superficie interior, presiones de saturación y condensaciones.

En este capítulo tan sólo se verán los resultados finales, el informe de cada solución con

las presiones y condensaciones de todas sus respectivas capas se puede encontrar en los Anexos.

Ubicación	
Capital de provincia:	Barcelona
Altitud de referencia [m]:	1
Temperatura interior (CTE-HE):	20°C
Humedad interior	
Higrometría:	≤ 3
HR interior constante	50%
Producción de humedad y renovación del aire	
G [kg/h]:	0,01
N[h ⁻¹]:	1
V[m ³]:	10
Disposición del cerramiento:	Horizontal y flujo ascendente

Tabla 17. Condiciones de cálculo de las condensaciones exteriores e intersticiales.

Fuente: CTE-DA-DB-HE/2, 2013

G es el ritmo de producción de la humedad interior [Kg/h];

N es la tasa de renovación de aire [h⁻¹].

V es el volumen de aire del local [m³].

La comprobación de la limitación de condensaciones superficiales se basa en la comparación del factor de temperatura de la superficie interior f_{Rsi} y el factor de temperatura de la superficie interior mínimo $f_{Rsi,min}$ para las condiciones interiores y exteriores correspondientes al mes de enero de la localidad.

El f_{Rsi} de cada solución constructiva, se obtiene a partir de su transmitancia térmica mediante la siguiente ecuación: $f_{Rsi} = 1 - U \cdot 0,25$ ^[29]

El $f_{Rsi,min}$ de un cerramiento se puede calcular a partir de la siguiente expresión ^[30]:

$$f_{Rsi,min} = \frac{T_{si,min} - T_e}{20 - T_e}$$

Donde;

- T_e es la temperatura exterior de la localidad en el mes de enero [°C],

- $T_{si,min}$ es la temperatura superficial interior mínima aceptable [°C]

O directamente desde el CTE, $f_{Rsi,min} = 0,56$.

El otro aspecto que hay que analizar es la condensación intersticial. El procedimiento para su comprobación se basa en la comparación entre la presión de vapor y la presión de vapor de saturación que existe en cada punto intermedio de un cerramiento formado por diferentes capas, para las condiciones interiores y exteriores correspondientes al mes de enero. Para que no se produzcan condensaciones intersticiales se comprueba que la presión de vapor en la superficie de cada capa, P_n , sea inferior a la presión de vapor de saturación, $P_{sat,n}$. La forma de obtener dichas presiones es mediante el cálculo para cada envolvente; primero su distribución de temperaturas en cada capa, la distribución de presiones de vapor de saturación para las temperaturas anteriores y finalmente, la distribución de presiones de vapor.

Cubierta	$f_{Rsi,min}$	f_{Rsi}	$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$	$P_n \leq P_{sat,n}$	Condensación	Cumple
AC1	0,56	0,3	✗	✓	0	NO
E60	0,56	0,811	✓	✓	0	Sí
PCTC1	0,56	0,867	✓	✓	0	Sí
PITC1	0,56	0,893	✓	✓*	0,0091	Sí
PCTF1	0,56	0,898	✓	✓	0	Sí
PCTC2	0,56	0,926	✓	✓	0	Sí
PITC2	0,56	0,917	✓	✓*	0,0026	Sí
PCTF2	0,56	0,926	✓	✓	0	Sí
PITF1	0,56	0,917	✓	✓*	0,0027	Sí

Tabla 18. Comparativa de los resultados de las condensaciones exteriores e intersticiales. Fuente: eCondensa.

* $P_n = P_{sat,n}$

En definitiva, analizando la tabla, se observa como f_{Rsi} aumenta progresivamente según la evolución de las cubiertas, lo que es muy buen dado que cuanto más supere f_{Rsi} a $f_{Rsi,min}$, menos probabilidades de condensación exterior habrá. Y no es casualidad que el factor f_{Rsi} aumente a medida que más se acerca las cubiertas actuales. Se ha de recordar que dicho factor depende linealmente de la transmitancia térmica de la envolvente, y por lo consiguiente, a menor transmitancia mayor es el factor. La única

solución que no cumple esa condición, es la azotea catalana, aunque no presente condensaciones intersticiales. Lo que no es de extrañar dado que, esa cubierta no disponía ni de aislante ni de impermeabilizante.

Por otro lado, se puede apreciar como todas las soluciones verifican la condición de presión de saturación. Es necesario remarcar el caso de las cubiertas PITC1, PITC2 y PITF1 que presenta condensación acumulada y aun así verifican la condición de $P_n \leq P_{sat,n}$. Pues bien, esto es debido a que alguna de sus respectivas capas presenta una igualdad entre $P_{sat,n}$ y P_n . Es decir, está al límite. El factor común que tienen estas tres es que son invertidas. Si se analizan los informes de estos tres casos proporcionados por eCondensa, en los anexos, se podrá observar que la condensación se produce en la capa de la lámina de impermeabilización, lo cual está bien. Así pues mientras la lámina no presente fisuras, no habrá de que preocuparse.

11. Estudio del impacto medioambiental de las soluciones constructivas

El proceso de fabricación de los materiales y productos de la construcción tiene un fuerte impacto que afecta negativamente al medio ambiente, provocando la disminución de los recursos naturales y el aumento del gasto energético. La extracción del material natural, su transformación en materia prima, el proceso de fabricación del producto y el consumo de energía derivada del petróleo, originan emisiones de todo tipo, muchas tóxicas, contaminantes y potencialmente peligrosas para la salud.

La herramienta de trabajo más utilizada en el estudio de la repercusión ambiental de materiales y soluciones constructivas es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este método analiza los diferentes procesos a qué están sometidos los materiales (producción, transporte, utilización, etc.) y establece indicadores que los penalizan: efecto invernadero, ozono, energía, residuos, etc.

Pese a que todos los materiales de construcción provocan un impacto sobre el medio ambiente, cada uno lo hace de forma diferente. Los de origen pétreo, por ejemplo, repercuten principalmente en el lugar de extracción, afectando al paisaje y originando emisiones de polvo. Los metales, además, consumen grandes cantidades de energía en el proceso de transformación, pero también se han de considerar las prestaciones y las posibilidades de reciclaje. Los plásticos tienen como impacto adicional las emisiones tóxicas que producen al ser incinerados. La madera es un recurso natural renovable (si su producción es correctamente gestionada), que consume poca energía en los procesos de transformación más usuales pero que, para algunos usos, puede requerir tratamientos de protección que a menudo originan emisiones y residuos tóxicos.

Los impactos considerados en este estudio afectan, en general, a la energía, a las emisiones de CO₂ y a los residuos de los materiales. Así pues, para cada uno de las soluciones constructivas, vistas anteriormente, se les va a determinar estos tres aspectos medioambientales.

11.1. Información medioambiental del BEDEC

Los impactos medioambientales, tales como; el coste energético, las emisiones de CO₂ y los residuos fueron proporcionados por el Banco de Datos de la Construcción de ITeC (BEDEC). Los criterios que se han utilizado en la elaboración de dichos datos, son explicados a continuación.

11.1.1. Coste energético y emisión de CO₂

Para cada material se muestra el coste energético y la emisión de CO₂ por unidad de medidas calculadas a partir de la cantidad de material constitutivo que los forma operados por el valor unitario de coste energético y emisión de CO₂ de este material constitutivo.

Para los materiales, el coste energético contempla el proceso de extracción, el transporte del origen en la fábrica y el proceso de transformación en fábrica de sus materiales constitutivos. No se contempla el coste energético que supone la transformación del material en un elemento específico (por ejemplo, la transformación del acero en un tubo, perfil o plancha) ni el transporte del material del almacén del fabricante hasta la obra.

Cada material constitutivo tiene asociado una constante de coste energético y de emisión de CO₂. El valor de las constantes se obtuvo a partir de datos facilitados por el Instituto Catalán de la Energía - ICAEN y de datos obtenidos de equipos de investigación de la UPC.

11.1.2. Residuos

En cuanto al establecimiento de los datos de los residuos, se estudiaron los residuos procedentes de las rupturas y mermas de material derivadas de la ejecución de cada partida y los originados por los embalajes de los materiales más significativos de la obra (ambos referidos en m³ y Kg), siendo esta información la base para poder plantear una mínima separación selectiva en obra.

11.2. Análisis medioambiental de los materiales utilizados

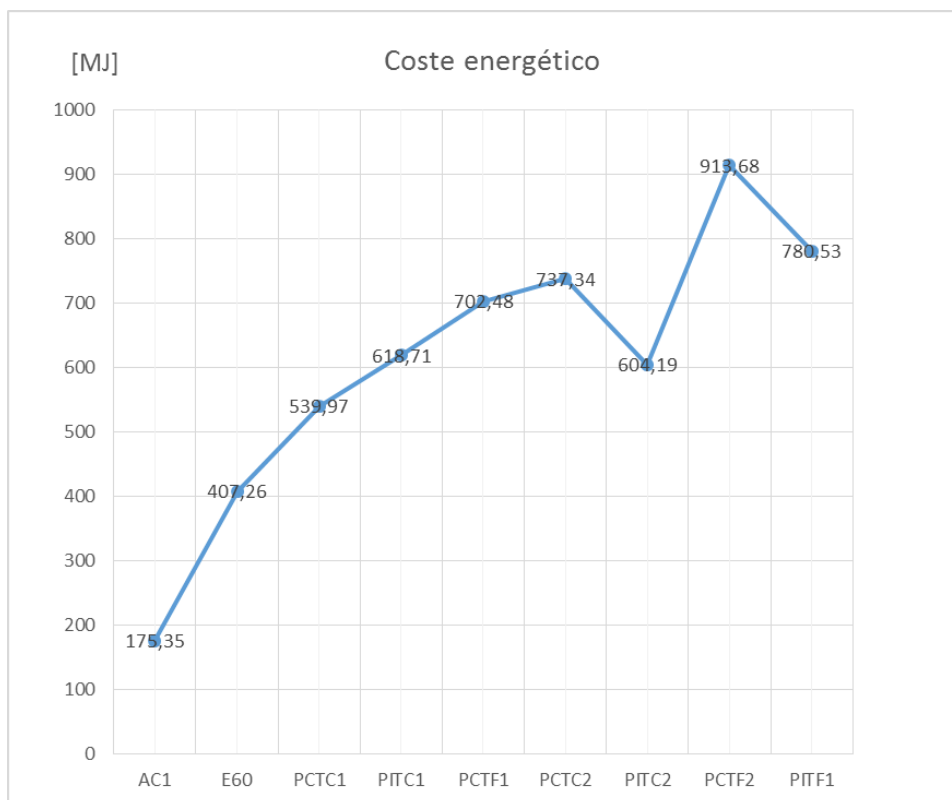
11.2.1. Comparación de los resultados de energía y emisiones

Cubierta	E [MJ]	E [KWh]	CO ₂ [Kg]
AC1	175,35	48,74	15,8
E60	407,26	113,13	65,58
PCTC1	539,97	150,02	58,76
PITC1	618,71	171,89	87,4
PCTF1	702,48	195,19	88,66
PCTC2	737,34	204,83	106,16
PITC2	604,19	167,84	86,49
PCTF2	913,68	253,81	121,01
PITF1	780,53	216,82	101,34

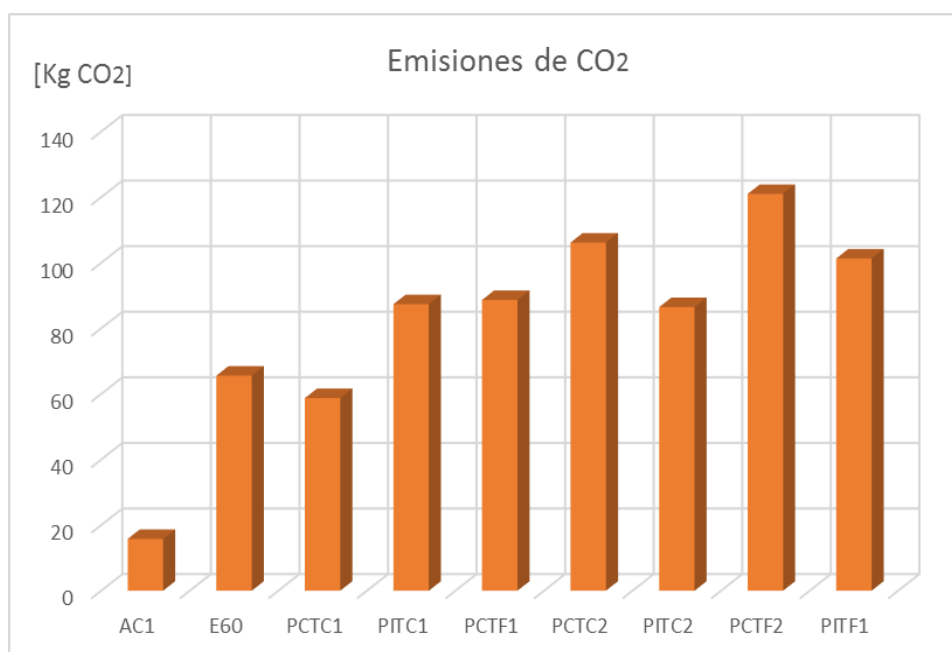
Tabla 19. Resultados de la energía consumida y emisiones totales de los materiales.
Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Analizando los resultados se aprecia claramente, tanto en la tabla como en las gráficas, una tendencia al aumento de los MJ y CO₂ en las envolventes a medida que las soluciones son más nuevas. Esto es debido, por un lado, al aumento de número de elementos que componen una solución y por otro lado, a la utilización de materiales con procesos de fabricación más complejos. Sin embargo, observando la configuración de las cubiertas invertidas, se aprecia una notoria bajada en el impacto respecto a las soluciones respectivas convencionales. Pero es cierto que, dichas cubiertas presentan una transmitancia mayor. En conclusión, lo que se puede sacar de este hecho, es que, hoy por hoy, si se desea una buena resistividad térmica eso implicará un alto impacto ambiental. Dada la correlación que existe entre ambos, se hace necesaria un desarrollo proporcional en ambas direcciones.

Es conveniente la utilización de materiales y sistemas de construcción con algún tipo de distintivo de calidad ambiental, como por ejemplo las eco-etiquetas, que garantice un impacto ambiental tan bajo como se pueda, fabricado con componentes reciclados, con consumo energético bajo, reutilizable y/o reciclable en el futuro.



Gráfica 3. Representación del impacto energético en las soluciones.



Gráfica 4. Representación de emisiones de CO₂ de las soluciones.

11.3. Desglose de los residuos según la LER

11.3.1. Introducción a los residuos de construcción

La industria de la construcción y demolición es el sector que más volumen de residuos genera, siendo responsable de la producción de más de 1 tonelada de residuos por habitante y año ^[31]. Los residuos de las obras de construcción pueden tener diferentes orígenes: la propia puesta en obra, el transporte interno desde la zona de acopio hasta el lugar específico para su aplicación, unas condiciones de almacenaje inadecuadas, embalajes que se convierten automáticamente en residuos, la manipulación, los recortes para ajustarse a la geometría, etc.

Los residuos de construcción y demolición suponen uno de los impactos más significativos de las obras por su gran volumen y su heterogeneidad. La primera razón acelera el ritmo de acumulación de sedimentos de los vertederos y eleva el número de transportes por carretera; la segunda, dificulta enormemente las opciones de valorización del residuo (ya que se incrementa el coste posterior del reciclaje). La solución a esta problemática se basa en la regla de las 3 erres: 3R = Reducir + Reutilizar + Reciclar. Y por lo tanto, uno de los factores más importantes, la gestión de los residuos en la obra debe empezar por su separación selectiva. En el siguiente apartado, se analizarán los resultados obtenidos de dicha separación selectiva de cada una de las cubiertas.

Son muchas las ventajas de llevar a cabo una separación selectiva de residuos de construcción. Por ejemplo; mediante la separación y recogida selectiva se reduce el volumen aparente de los residuos generados al disminuir los espacios huecos del contenedor. Se contribuye a dar una imagen de orden y de control general en la obra. Además, solamente mediante la separación y recogida selectiva se puede llevar a cabo una gestión responsable de los residuos peligrosos. Si un residuo peligroso contamina al resto de residuos, el conjunto debe gestionarse como peligroso. Por último, para fomentar el reciclado o reutilización de los materiales contenidos en los residuos, éstos tienen que estar separados. Técnicamente es imposible reciclar residuos mezclados, pues tienen propiedades físicas y químicas diferentes, e incluso puede verse afectada la maquinaria empleada en el proceso de valorización.

11.3.2. Clasificación de los residuos de construcción y demolición

En 2008 se aprueba el Real Decreto 105/2008 por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición a nivel estatal.

Dichos residuos pueden clasificarse en:

- Residuos inertes: Aquellos que no presentan ningún riesgo de polución de las aguas y de los suelos y que, en general, se podría asimilar a los materiales pétreos.
- Residuos no peligrosos (o no especiales): Son los que por su naturaleza pueden ser tratados o almacenados en las mismas instalaciones que los residuos domésticos.
- Residuos peligrosos (o especiales): Los formados por materiales que tienen determinadas características perjudiciales para la salud o el medio ambiente.

El carácter peligroso de los residuos de construcción y demolición, RCD, puede deberse a causas diferentes, como por ejemplo, que los materiales utilizados originalmente contuviesen proporciones altas de materiales que eran por sí peligrosos, como los fibrocementos, el plomo, los alquitranes y residuos de preservantes, adhesivos, colas y sellantes y ciertos plásticos. Por otro lado, algunos materiales, inicialmente no peligrosos, se pueden convertir en peligrosos como consecuencia de la mezcla o contacto con materiales peligrosos. Este es el caso de envases de pinturas arrojados al acopio de ladrillos y hormigón. También otra consecuencia puede deberse al medio en el cual han estado instalados los materiales, por ejemplo fabricas químicas. Por último el tipo de edificación y estructura y la época en que fue construida son factores que influyen en la presencia de residuos peligrosos, tanto en cantidad como en su tipología, por ejemplo el uso del plomo en la formación de las cubiertas a la mitad del siglo XIX.

11.3.3. Lista Europea de Residuos

La codificación, según el Catálogo o Lista Europea de Residuos, LER, se realiza de acuerdo con la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

La importancia de esta clasificación radica en dos aspectos: avanza información sobre si un residuo se considera o no peligroso y ayuda a clasificar correctamente los residuos en función de sus posibilidades de valorización. Los distintos centros de gestión (vertederos y plantas de selección y transferencia, reciclaje, etc.) deben indicar el tipo de codificación que aceptan según los residuos admitidos en sus instalaciones. En este catálogo se incluye una codificación que acompaña a los diferentes tipos de residuos, agrupados por capítulos según actividades industriales. Concretamente, la construcción tiene asignado el capítulo 17.

En la LER los residuos de construcción y demolición están identificados con el código LER 17 00 00 y proceden, en su mayoría, de derribos de edificios o de rechazos de los materiales de construcción de obras de nueva planta, y de obras de reformas en viviendas o urbanizaciones ^[32]. A continuación algunos ejemplos de los materiales que se han visto en este proyecto:

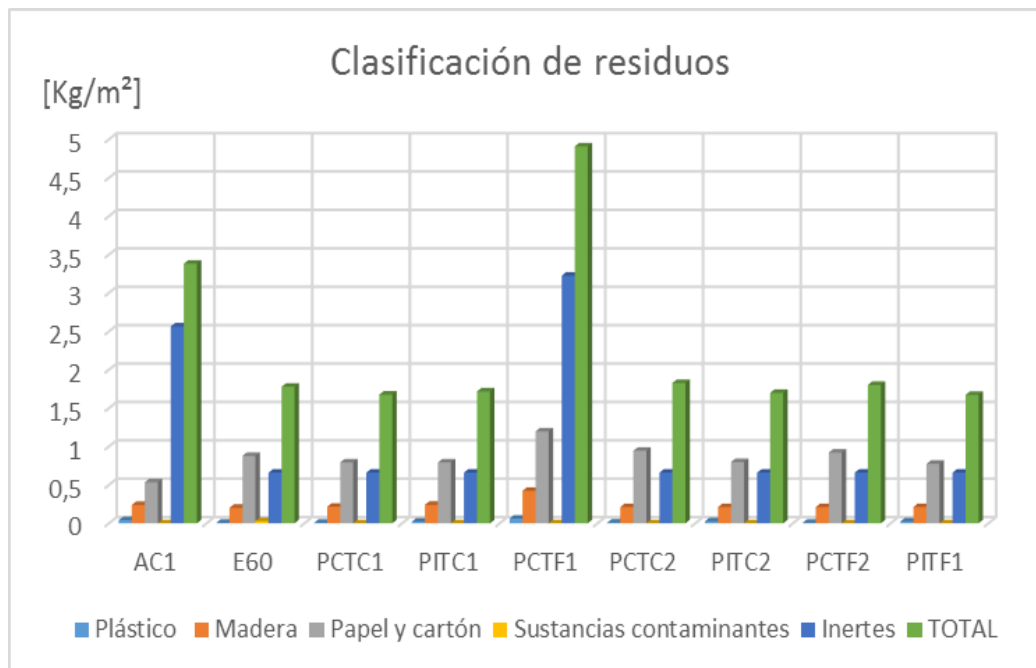
- 17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.
- 17 02 Madera, vidrio y plástico.
- 17 03 Mezclas bituminosas, alquitrán y otros productos alquitranados.
- 17 03 01* Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla.
- 17 04 Metales (incluidas sus aleaciones).

11.3.4. Comparación de los resultados obtenidos de residuos

[Kg/m ²]	Separación selectiva de residuos de embalaje e inertes							
Cubierta	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Inertes	TOTAL	peso cubierta + residuos	% Residuos
AC1	0,042	0,23938	0,53454	0	2,565	3,38092	123,381	2,7402
E60	0,007209	0,2036	0,8783	0,029153	0,66	1,778	125,078	1,4217
PCTC1	0,0071	0,2161	0,7925	0,000853	0,66	1,676	192,476	0,8710
PITC1	0,0228	0,2411	0,7925	0,000853	0,66	1,717	192,827	0,8905
PCTF1	0,0616	0,42368	1,19704	0,000853	3,225	4,908	132,018	3,7178
PCTC2	0,01063	0,2112	0,9451	0,000853	0,66	1,827	143,517	1,2735
PITC2	0,027109	0,2114	0,7985	0,000853	0,66	1,697	140,557	1,2079
PCTF2	0,00843	0,2112	0,9217	0,000853	0,66	1,802	140,242	1,2850
PITF1	0,024909	0,2114	0,7751	0,000853	0,66	1,672	137,282	1,2181

Tabla 20. Desglose de los residuos de embalaje y de colocación para cada solución.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbiente



Gráfica 5. Clasificación de los pesos de los residuos de embalaje para cada solución.

Lo más remarcable de estos datos, es la sección correspondiente a “Sustancias contaminantes”, es decir, envases con restos de sustancias peligrosas o contaminantes para ellas. La azotea catalana es la única que dispone de un valor igual a 0, y que no es de extrañar, ya que no se utilizaba el betún asfáltico ni el hormigón celular. El hormigón celular, como se vio anteriormente, fue utilizado tanto como aislante como material de formación de pendiente en la E60, cosa que implica un uso en grandes cantidades y por eso su despunte tan pronunciado. Por otro lado, con la aparición de nuevos aislante térmicos y del betún asfáltico en el ámbito de la construcción, el hormigón celular pasó a segundo plano.

En general a lo que se refiere a residuos de embalaje, estos, salvo alguna excepción como por ejemplo PCTF1, presentan unos valores más o menos homogéneos para todas las soluciones. La conclusión que se puede sacar de esto es que los tabiques para la formación de pendiente o cámara de aire, son los responsables de la generación de una gran cantidad de residuos. En general lo son, todos los materiales cerámicos, dado a parte de residuos de embalaje generan residuos inertes, es decir restos de hormigón, ladrillo y restos de materiales cerámicos. Todos los sistemas tienen en mayor o menor medida dichos residuos, pero tal como se ha podido observar las nuevas soluciones han sustituido

los tabiques para la formación de cámara de aire por las viguetas de hormigón pretensado, que no generan residuos inertes, al menos en la obra.

11.3.5. Sostenibilidad y generación de residuos

Después de haber analizado los residuos generados, toca ahora comentar algo sobre el efecto de los sistemas de producción industrializados y los avances tecnológicos en la generación y gestión de residuos. Su implicación ha abaratado los materiales de construcción hasta tal punto, que en muchas ocasiones los excedentes de las obras no se aprovechan sino que se convierten directamente en residuos destinados al vertedero. El fomento de la producción de materiales de nueva generación, con mayores prestaciones, pero que necesitan un elevado consumo de recursos y de energía, tienen el inconveniente de emitir una mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera, al agua y al suelo.

Las prioridades para la obtención de mejoras eficaces en la gestión de residuos deben consistir en; minimizar el uso de materias y recursos necesarios, reducir residuos, reutilizar materiales y reciclar residuos. Estos tres últimos, para cumplir con las siguientes funciones respectivamente. Primero, evitar las compras excesivas, el exceso de embalajes, etc. y evitar que los materiales se conviertan en residuos por acopios, transporte o manipulación inadecuados. Segundo, aprovechar los materiales desmontados durante las tareas de derribo que puedan ser utilizados posteriormente, reutilizar los recortes de piezas cerámicas, azulejos, etc. Y por último, realizar una clasificación correcta para favorecer esta acción. Otras prioridades, no menos importantes, son la necesidad de recuperar energía de los residuos destinando a centrales de incineración aquellos residuos que puedan servir de combustible para la producción de energía. Y todo eso con el fin de enviar la mínima cantidad posible de residuos al vertedero.

11.3.6. Plan de gestión de residuos

El Plan de Gestión de Residuos, PGR, es una herramienta de fácil aplicación para contribuir a la correcta gestión de los residuos de construcción y demolición. La información que debe contener un PGR son; las medidas de minimización de residuos y de prevención a tener en cuenta en la obra. La estimación de la cantidad de residuos que se van a producir, clasificados según su naturaleza y tipología. Las instalaciones previstas para el almacenamiento (ubicación y número de contenedores, etc.), manejo y demás operaciones de gestión. Una valoración del coste previsto para la gestión correcta de los residuos de construcción.

Se lleva un control y una penalización de residuos y vertidos mediante el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero. Regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

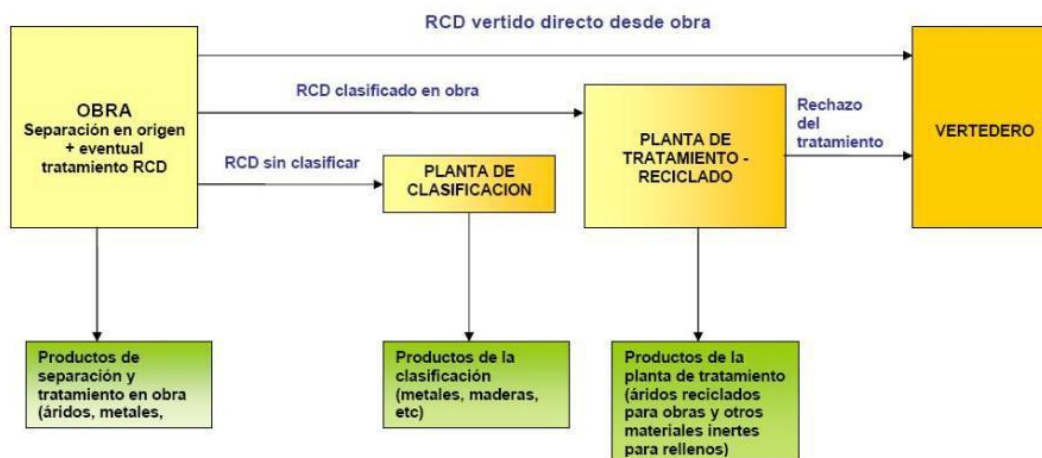


Imagen 12. Esquema de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición. Fuente: UPC, Rehabilitació i eficiència energètica en l'edificació.

12. Comparación de los procesos de sellos ambientales

12.1. Contexto y objetivos

En la década de los 90 comienzan a hacerse visibles los primeros sistemas de evaluación del comportamiento medioambiental de las edificaciones, centrándose principalmente en la afección al medioambiente. Estos sistemas proponían una serie de actuaciones con el fin de considerar las prestaciones ambientales del conjunto del edificio.

Si bien la mejor manera de analizar los impactos ambientales que un determinado producto puede tener, es la realización de un Análisis de Ciclo de Vida del mismo. La edificación ha resultado hasta la fecha un producto demasiado complejo para ser sometido de manera habitual a un ACV ordinario. Por ello, aunque la mayoría de los sistemas de evaluación puedan haber partido en su origen de estudios de ACV, los sistemas más utilizados están basados en la valoración de actuaciones, establecidas en créditos a los que se asocia un número de puntos en función de la importancia en los impactos asociados al crédito.

LEED, BREEAM y VERDE son herramientas para la evaluación de edificios que promueven la sostenibilidad y las buenas prácticas medioambientales para el diseño, construcción, funcionamiento y explotación de edificios. Así pues, al inicio de este proyecto se tuvo la idea de, llegados a este punto, analizar según los tres sellos mencionados anteriormente los sistemas constructivos estudiados. Sin embargo, analizando los sellos y su sistema de calificación se vio que era, aparte de inviable, imposible realizar una certificación correcta.

Los principales obstáculos fueron que estos sellos no analizan el sistema constructivo según su capacidad funcional, salvo VERDE que sí ofrece una puntuación de la transmitancia obtenida por la solución constructiva respecto la del edificio de referencia.

Básicamente, estos sistemas de certificación, enfocan la puntuación en la procedencia de los materiales, su impacto, residuos y otras cosas, como eco-etiquetas, de las que disponen y etc. Lo cual, tampoco es suficiente para un correcto estudio, dado que los materiales escogidos son genéricos, como también lo son sus características y propiedades. Más aún, dada la situación legal, la cual no obliga sino tan solo aconseja el uso de productos reciclados en la construcción, se hace imposible realizar ninguna puntuación.

El código de eco-eficiencia 21/2006, por el cual se regula la adopción de criterios ambientales y de eco-eficiencia en los edificios, el EHE/08, la Instrucción Española de hormigón estructural que promueve un 20% reciclado en los hormigones, junto con las eco-etiquetas, mencionadas anteriormente, son las encargadas de difundir las prácticas ambientalmente sostenibles en la construcción.

En definitiva, lo que se ha llevado a cabo es un pequeño estudio de BREEAM, LEED y VERDE en los créditos de materiales y transmitancias. Un resumen de los objetivos, de la forma de puntuación de cada uno, y de sus requisitos.

12.2. Certificación de materiales y residuos BREEAM

12.2.1. Crédito: Materiales de bajo impacto ambiental

El objetivo del crédito es impulsar la utilización de materiales de construcción de bajo impacto ambiental durante todo el ciclo de vida del edificio.

Puntuación	Criterio
1 punto	Cuando al menos el 80% de los componentes principales de 2 de los elementos de la <i>tabla 22</i> , disponen de una etiqueta tipo II (Autodeclaración).
2 puntos	Cuando al menos el 80% de los componentes principales de 2 de los elementos de la <i>tabla 22</i> , disponen de una etiqueta tipo I o tipo III.
3 puntos	Cuando al menos el 80% de los componentes principales de 3 de los elementos de la <i>tabla 22</i> , disponen de una etiqueta tipo I o tipo III.
4 puntos	Cuando se utiliza una herramienta de ACV para evaluar una gama de operaciones de materiales del edificio y se pueda demostrar que dicha evaluación ha influido positivamente en el 100% de los componentes principales de 4 de los elementos del edificio.
Nivel ejemplar: 5	Cuando se utiliza una herramienta de ACV para evaluar una gama de operaciones de materiales del edificio y se pueda demostrar que dicha evaluación ha influido positivamente en el 100% de los componentes principales de 5 de los elementos del edificio.

Tabla 21. Criterio y puntuación en el crédito de materiales de bajo impacto ambiental BREEAM.

Los componentes principales de los elementos del edificio deben contener productos y materiales que dispongan de etiquetas ambientales (Tipo I, Tipo II y Tipo III) o utilizar una herramienta ACV para seleccionar qué componentes utilizar. Para cumplir los requisitos de puntuación del crédito, al menos el 80% de los componentes principales de los elementos deben disponer de etiquetas ambientales. Si se utiliza una herramienta de ACV, ésta debe haber influido positivamente en el 100% de los componentes principales de los elementos del edificio que se elijan. La influencia positiva en el diseño se puede demostrar realizando un análisis completo que compare un edificio tipo y el edificio evaluado.

La herramienta ACV utilizada para poder optar a la puntuación extra debe tener como mínimo, las siguientes características: un mínimo de 3 indicadores medioambientales

(uno de ellos el cambio climático). Debe considerar todo el ciclo de vida del edificio. Debe estar basada en los principios de ACV tal y como está definido en los estándares internacionales ISO que lo regulan.

Elementos	Ejemplos de los componentes principales
Estructuras (incluye forjado)	Hormigón armado, madera, ladrillo, hormigón prefabricado, acero, piedra, viguetas, bovedillas, etc.
Fachadas	Ladrillo, bloque hormigón, piedra, panel metálico, revestimientos, baldosas, etc
Ventanas	Aluminio, PVC, madera, vidrio, etc.
Cubiertas	Teja, pizarra, sintéticos, fibrocemento, paneles galvanizados, etc.
Aislamientos	Lana mineral, poliestireno, poliuretano, vidrio celular, láminas bituminosas, etc.
Urbanización y cierres	Pavimentos (césped, adoquines, asfalto, etc.) cierres (ladrillo, aluminio, madera, etc.)
Particiones verticales	Ladrillo, yeso laminado, madera, pintura, etc.
Revestimiento de suelos	Madera, cerámica, hormigón, etc.

Tabla 22. Elementos y ejemplos de los componentes principales en construcción.

12.2.2. Crédito: Gestión de residuos

El objetivo principal es promover la eficiencia de los recursos a partir de una gestión efectiva y apropiada de los residuos de la obra.

Puntuación	Criterio
1 punto	Si se demuestra que se ha realizado para la fase de proyecto, un estudio de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición.
2 puntos	Si se cumple el punto uno y los objetivos de reutilización, reciclado u otra forma de valorización son como mínimo un 60% en peso de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) totales generadas en la obra.
3 puntos	Si se cumple el punto dos y los objetivos de reutilización, reciclado u otra forma de valorización son como mínimo un 80% en peso de los RCD totales generado en la obra.
Nivel ejemplar: 4 puntos	Si se cumple el punto tres y el 95% de los residuos identificados en el Estudio de Gestión de Residuos (EGR) se hayan tratado con criterios de reutilización, reciclaje o valoración consiguiendo eliminar la fracción de residuos con destino a vertedero.

Tabla 23. Criterio y puntuación en el crédito de gestión de residuos BREEAM.

Obtención de 1 punto:

- a) En la fase de redacción del proyecto se debe disponer de un EGR para regular la gestión y producción de los residuos de construcción y demolición.
- b) En la fase previa a la ejecución se debe pasar de un EGR a un PGR, definiendo para cada flujo de residuo identificado (según Lista Europea de Residuos) el tratamiento adecuado, y con unos objetivos de valorización específicos.
- c) Se deben cumplir las siguientes especificaciones:
 - i. Evaluar posibles alternativas para la prevenir y minimizar la generación de residuos.
 - ii. Usar técnicas o materiales que disminuyan/eliminen los flujos comunes de residuos.
 - iii. Tener en cuenta como mínimo tres grupos clave de residuos en la fase de diseño.
 - iv. Identificar alternativas y/o mercados para materiales reciclados o valorizados para que se pueda cuantificar el beneficio ambiental derivado.
 - v. Hacer un seguimiento con el PGR durante la construcción y plasmar las conclusiones.

Obtención de 2 puntos:

- a) Haber conseguido el punto número 1.
- b) Los objetivos de reutilización, reciclado u otra forma de valorización deben ser como mínimo un 60% (en peso o volumen) del RCD total generado en obra (no se cuentan los residuos peligrosos). El objetivo debe estar registrado y justificado como parte de la implementación del EGR y cuando la obra se complete.

Obtención de 3 puntos:

- a) Haber conseguido el punto número 2.
- b) Los objetivos de reutilización, reciclado u otra forma de valorización deben ser como mínimo un 80% del RCD total generado en obra de al menos las fracciones de residuos identificadas en la normativa vigente (no se cuentan los residuos peligrosos). Se debe proceder a la segregación selectiva de estos residuos en origen, para cualquier tipo de obra e independientemente de los volúmenes producidos.
- c) La fracción destinada a su eliminación a partir de su depósito en vertedero deberá ser como máximo un 20% en peso o volumen, del EGR.

Nivel ejemplar:

Se tiene que haber conseguido el punto número 3b. Que el 95% de los residuos identificados en el EGR (los peligrosos no) hayan sido tratados con criterios de reutilización, reciclaje, valorización consiguiendo eliminar la fracción de residuos con destino al vertedero.

12.3. Certificación de materiales y residuos LEED

12.3.1. Crédito: Materiales de bajo impacto ambiental

Usar productos que cumplan uno o más de los siguientes criterios (0,5 puntos cada uno). Al menos el 90% de cada componente cumplidor; acabado suelo, aislamiento, revestimiento, estructura, etc. por peso o volumen debe cumplir uno de los siguientes requisitos para poder optar al punto.

- a) Los productos de madera deben estar certificados por el Consejo Regulador de Bosques (FSC) o un organismo equivalente aprobado por USGBC.
- b) Materiales con base biológica. Los productos con base biológica deben cumplir el Estándar de Agricultura Sostenible de la Red de Agricultura Sostenible. Las materias primas con base biológica se deben ensayar usando el Método de Ensayo ASTM D6866 y estar legalmente recogidas, tal como define el país exportador y el importador. Excluir productos de piel.
- c) Responsabilidad extendida al productor. Los productos comprados a un fabricante que participe en un programa de responsabilidad extendida al productor o sea directamente responsable de la responsabilidad extendida al productor.

12.3.2. Crédito: Gestión de residuos

El objetivo del crédito es desviar los residuos de la obra a vertederos e incineradoras, los materiales reciclables recuperados hacia el proceso de fabricación y los reutilizables al lugar apropiado.

Puntuación	Criterio
1 punto	Si el porcentaje de materiales reciclados y/o recuperados es como mínimo del 50%.
2 puntos	Sí el porcentaje de materiales reciclados y/o recuperados es como mínimo del 75%

Tabla 24. Criterio y puntuación en el crédito de gestión de residuos LEED.

Se calcula el porcentaje de materiales que deben reciclarse o recuperarse, P_{rec} . Se puede calcular tanto en peso como en volumen:

$$P_{reciclados,recuperados}(\%) = \frac{\text{Residuos que se reciclan,recuperan (peso o vol)}}{\text{Residuos totales generales en la obra (peso o vol)}} \times 100$$

Se debe considerar el reciclaje de cartón, metal, ladrillos, baldosas, hormigón, plástico, madera cepillada, vidrio, particiones de yeso-cartón, moquetas y aislamientos. En el PGR se debe indicar la cantidad de residuos que se prevé generar en la obra y la posterior gestión que se hará de ellos.

12.4. Certificación de materiales y residuos VERDE

12.4.1. Crédito: Impacto de los materiales de construcción

Este crédito intenta reducir los impactos asociados a la producción de los materiales de construcción.

Referencias	Criterio
Práctica habitual	Impactos iguales al edificio de referencia.
Mejor práctica	Un 20% menos de los impactos generados por el edificio de referencia.

Tabla 24. Criterio y puntuación en el crédito de impacto de materiales y residuos de construcción VERDE.

Se incluyen los materiales empleados en cubiertas, forjados, pavimentos, fachada, medianeras y particiones interiores. Se deben elegir materiales con bajos impactos para el medioambiente como los que tengan certificación medioambiental, maderas provenientes de bosques sostenibles o los materiales con Declaración Medioambiental.

Para realizar la evaluación del edificio se sigue el procedimiento de cálculo siguiente:

- Calcular las superficies de los elementos y sistemas constructivos.

- b) Indicar las características ambientales de los materiales y elementos constructivos: distinguir los que provengan de reutilización, los que puedan ser reutilizados, así como los que tengan origen local y los que no.
- c) Determinar el peso de los elementos constructivos de la medición.
- d) Asignar impactos asociados a cada material o elemento constructivo de una base de datos reconocida (Base de datos BEDEC, Etiquetas Tipo III, inventario ACV).

12.4.2. Crédito: Transmitancia de los cerramientos

Objetivo del crédito, limitar el consumo de energía en la calefacción incorporando cerramientos con alta resistencia térmica.

Referencias	Criterio
Práctica habitual	Transmitancia térmica de los cerramientos iguales al edificio de referencia del CTE
Mejor práctica	Conseguir que las transmitancias de los cerramientos estén un 20% por encima del CTE
Peor práctica	Conseguir que las transmitancias de los cerramientos estén un 60% por debajo del CTE

Tabla 25. Criterio y puntuación en el crédito de Transmitancia de los cerramientos VERDE.

Se considera como punto base el 50% de la diferencia entre el máximo y el mínimo. Cálculo de la energía incorporada a los materiales del edificio (evaluar con el mismo procedimiento y de forma simultánea al apartado anterior).

La siguiente tabla (*Tabla 25.bis*) muestra la diferencia en porcentaje, obtenida de las soluciones constructivas analizadas anteriormente, respecto las transmitancias marcadas por el CTE-HE1.

Cubierta	U_i [W/m²K]	U_{LIM} [%]	U_{REF} [%]	U_{PRED} [%]
AC1	4,6052	-821,05	-1023,23	-1902,28
E60	0,8471	-69,42	-106,62	-268,32
PCTC1	0,5752	-15,05	-40,30	-150,11
PITC1	0,4571	8,57	-11,49	-98,74
PCTF1	0,4307	13,84	-5,06	-87,28
PCTC2	0,3079	38,41	24,89	-33,87
PITC2	0,3477	30,44	15,17	-51,21
PCTF2	0,3071	38,57	25,08	-33,53
PITF1	0,3467	30,64	15,41	-50,77

Tabla 25 bis. Porcentaje de diferencia entre las transmitancias obtenidas y las marcadas por el CTE.

Evidentemente, los cuatro últimos cerramientos cumplen con el criterio de transmitancias respecto el CTE, dado que estas soluciones fueron obtenidas del mismo *Catálogo de Elementos Constructivos* del CTE. Por lo tanto se verifica, la mejor práctica. Ha de recordarse, que la exigencia necesaria a cumplir corresponde a la U_{LIM} y la comparación que realiza VERDE es respecto un edificio de referencia proporcionado por el CTE que marca la U_{REF} . Aunque ni PITC2 ni PITF1 superen el 20%, están muy cerca y con un aislante más apropiado, sin duda se alcanzaría el valor deseado.

12.4.3. Crédito: Gestión de residuos de la construcción

En este caso, el objetivo es reducir residuos que se generan durante la obra del edificio usando elementos prefabricados e industriales o empleando procesos de obra.

Referencia	Criterio
Práctica habitual	Reducción del 0% de los residuos de la construcción.
Mejor práctica	Reducción del 80% de los residuos de la construcción.

Tabla 25. Criterio y puntuación en el crédito de gestión de residuos de la construcción VERDE.

Se debe calcular el volumen de residuos generados en la construcción del edificio en los elementos a evaluar. Para este apartado se deben tener en cuenta los residuos que provienen de los materiales empleados en: cubiertas, forjados completos (incluido el pavimento), fachada y particiones interiores (incluidos acabados) y también los que se

obtienen de durante la fase de construcción del edificio pero no se consideran los residuos obtenidos durante la demolición ni desmantelamiento del edificio.

Actualmente es obligatorio elaborar junto a los Proyectos de Ejecución, un Plan de Gestión de Residuos de la Construcción (PGR) donde se indique la cantidad de residuos que se prevé y la gestión que se hará de ellos.

12.5. Utilización de materiales reciclados y reutilizados

Existen muchos productos de construcción que se componen de materiales reciclados. Algunas de las prácticas más habituales al respecto son la utilización de áridos reciclados para bases, sub-bases, etc., así como la elaboración de composites a partir de residuos y subproductos diversos (por ejemplo, hormigón con caucho reciclado de neumáticos usados, pastas niveladoras de restos de pizarra, morteros de proyección con lodos de la industria papelera, fibras naturales como refuerzo de pastas, etc.).

También existen materiales que pueden ser reutilizados, restaurados o recuperados. La reutilización de materiales supone un menor impacto que el reciclaje, por tanto es una prioridad en la construcción sostenible y en las certificaciones medioambientales se intenta fomentar su uso.

La utilización de materiales con contenido en material reciclado o materiales reutilizados repercutirá en la disminución del uso de materiales vírgenes, en la reducción de residuos medioambientales y en el impacto ambiental asociados con la extracción y el procesado de materias primas.

12.5.1. Comparativa de las certificaciones utilización materiales reciclados

En BREEAM se valora el uso de materiales reciclados/reutilizados en el apartado de “Materiales de bajo impacto ambiental”. Si los componentes de los elementos que se incluyen en el crédito tienen contenido en materiales reciclados/reutilizados y se puede demostrar su utilización con una etiqueta ecológica o con una herramienta de ACV, su uso favorecerá a la obtención de puntuación en el crédito ^[33].

En el caso de VERDE, el uso de materiales reciclados/reutilizados se valora en los apartados “Impacto de los materiales de construcción” y “Energía no renovable en materiales de construcción”. Cuando se le asignen los impactos a los diferentes materiales, el hecho de tener contenido en materiales reciclados/reutilizados y por tanto un impacto medioambiental más bajo, favorecerá a la obtención de puntuación en el crédito ^[34].

LEED en cambio, valora por separado el uso de material reciclado (mínimo un 10% del valor total de los materiales del proyecto para puntuar) y de material reutilizado (mínimo un 5% del valor total de los materiales del proyecto) ^[35].

Conclusiones

A causa de la gran urbanización, que crea la necesidad de recuperar espacio en la ciudad y propiciada por los factores climáticos mediterráneos, poco lluviosos y muy calurosos, la cubierta plana transitable ha conseguido un gran protagonismo en las zonas de climas benignos. Dicha cubierta no es hasta la mitad del siglo XX que sufre su despegue con la aparición de nuevos materiales en el ámbito de la construcción. Los más conocidos fueron las cubiertas planas transitables convencionales y/o invertidas, con o sin cámara de aire. Ciertamente, la aparición de los aislantes térmicos, como poliestireno extruido y de las láminas de impermeabilización, de betún asfáltico, marcaron un antes y un después en la formación de las envolventes. Dicho avance, a posteriori, dio lugar a las normas y reglamentos que pretendían regular y limitar la demanda energética en las viviendas. Sin embargo, esto implicaba también un aumento considerable en el impacto medioambiental. Especialmente, en las emisiones de CO₂ y energía consumida. Por otro lado los residuos de embalaje prácticamente se han mantenido constantes y especialmente han notado una gran bajada con la utilización de viguetas de hormigón.

Definidas las cubiertas a estudiar y realizado el análisis tanto térmico como higrotérmico se vio una importante mejoría, se observó una regresión en el aumento de la transmitancia térmica, que marcada por las normas y reglamentos como por ejemplo el CTE, han conseguido llegar a unos valores realmente bajos. Mientras que, a lo que se refiere a la condensación acumulada, es cierto que en las soluciones constructivas más nuevas aparecían condensaciones intersticiales, pero también es cierto que no producían ningún efecto negativo. En sí, la aparición de condensación, si es producida donde le corresponde no implica necesariamente algo perjudicial. Las mejores soluciones, obviamente, fueron las marcadas por el CTE, y sobre todo teniendo en cuenta factor del clima mediterráneo, las cubiertas planas transitables invertidas con cámara de aire son la mejor opción.

Por último la certificación ambiental. Desgraciadamente, no se pudo realizar un análisis y certificación de las soluciones dado que el enfoque de los sellos no permite ejecutar esa tarea. Además, tampoco facilita realizar un estudio del impacto ambiental de los materiales genéricos, debido a falta de información y ausencia de leyes que regulen la utilización de materiales totalmente o en parte reciclados y/o recuperados. Es conveniente pues, repensar la forma de abordar las envolventes, que tienen tanto BREEAM y LEED, y asemejarla más a VERDE, que en este aspecto si permite una comparación de la transmitancia con un valor de referencia.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] ADAMS, W. M. INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE – IUCN. *El futuro de la Sostenibilidad. Re-pensando el Medio Ambiente y el Desarrollo en el siglo XXI*. Zurich: Reporte de la reunión de pensadores, 2006.
- [2] [31] [32] PLANAS, C. *Sostenibilitat a l'edificació*. Departamento de ingeniería de construcción. Apuntes, 2015.
- [3] CURSO; CUCHÍ, A. *Com fer projectes sostenibles*. COAC, 2008.
- [4] PLANAS, C. *Rehabilitació i eficiència energètica en l'edificació*. Departamento de ingeniería de construcción. Apuntes, 2015. Y Europa. Síntesis de la legislación de la UE [en línea]. 2015 [http://europa.eu/legislation_summaries/].
- [5] [15] [19] PRESIDENCIA DEL GOBIERNO. *Norma básica de la edificación NBE-CT-79. Condiciones térmicas en los edificios*. Publicación BOE, 1979. [Citado en; tabla 2.1; tabla 2. 8]
- [6] MINISTERIO DE FOMENTO. *Código técnico de edificación – CTE. Documento básico HE, ahorro de energía*. Publicación BOE, 2013. [Citado en; tabla 2.1]
- [7] [29] [30] MINISTERIO DE FOMENTO. *Documento de apoyo al documento básico DB-HE Ahorro de energía - CTE. Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersiticiales en los cerramientos. DA DB-HE/2*. Publicación BOE, 2013. [Citado en; pg.3-5]
- [8] NEILA GONZÁLEZ, F.J. y ACHA ROMÁN, C. *Arquitectura Bioclimática y Construcción Sostenible*. Pamplona: DAPP, publicaciones jurídicas, 2009. [Citado en; pg. 26]
- [9] LAS PROVINCIAS. *EL CLIMA MEDITERRANEO*. [En línea]. 2015 [<http://eltiempo.lasprovincias.es/articulos-divulgacion/clima-mediterraneo>]
- [10] GENERALITAT DE CATALUNYA. Institut d'Estadística de Catalunya. *Territori i Mediambient. Climatologia*. [En línea]. 2015. [<http://www.idescat.cat>]

- [11] [14] [21] [24] [26] SÁNCHEZ-OSTIZ, GUTIÉREZ, A. *Cerramientos de edificios. Cubiertas*. Madrid, 2002. Editorial: CIE DOSSAT 2000. [Citado en; pg. 67; pg. 73; pg.74-90; pg. 91; pg. 93]
- [12] [13] [23] INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA – ITEC. *La construcción de la arquitectura 2. Los elementos*. 2ª Edición. Barcelona, 1989. [Citado en; pg. 58; pg. 52; pg.37]
- [16] [18] P.BENAVENT de BARBERÁ. *Como debo construir. Manual práctico construcción de edificios*. 1ª Reimpresión. Barcelona, 1993. Editorial: BOSCH. [Citando en; pg.163-165]
- [17] [20] [22] COLEGIO OFICIAL DE ARQUITECTOS DE MADRID – COAM. *Curso de rehabilitación 6. La cubierta*. Madrid, 1984. [Citado en; pg. 57-60]
- [25] [27] INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA – ITEC. *Catàleg d'elements constructius del CTE*, v2.1. [En línea], 2011. [<http://itec.cat/cec/>]
- [28] MINISTERIO DE FOMENTO. *Código técnico de edificación – CTE. Catálogo de elementos constructivos*. Redacción: Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción, 2010. [Citado en; Capítulo 3. Materiales y productos]
- [33] BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT-BRE. *Manual BREEAM ES VIVIENDA. Materiales y Residuos*. Redacción: Instituto Tecnológico de Galicia. Noviembre, 2011
- [34] SPAIN GREEN BUILDING COUNCIL-SGBC. *Manual LEED v4 HOMES: Diseño y Construcción. Energía y Atmosfera*. Noviembre, 2013
- [35] GREEN BUILDING COUNCIL ESPAÑA-GBCe. *Guía de evaluación medioambiental VERDE RH. Residencial. Impacto de los materiales, Envolverte y Clasificación de los residuos*. Mayo, 2013.

Bibliografía complementaria

INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA – ITEC. *Contingut i criteris BEDEC*. Barcelona, 20016.

INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA – ITEC. *Alternatives a la construcció convencional d'habitatges*. Barcelona, 2001.

INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA – ITEC. *Prácticas de sostenibilidad en edificación*. Barcelona, 2005.

INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA – ITEC. *Norma reglamentària d'edificació sobre aïllament tèrmic. NRE-AT-87*. Barcelona, 2004.

MINISTERIO DE FOMENTO. *Documento de apoyo al DB-HE*. CTE; 2013.

UNE-104-242/84. Láminas de betún asfáltico modificado. Norma Española, 1984.

UNE-EN-12524. *Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores de diseño tabulados*. Norma Española, 2000.

NORMA BÁSICA DE LA EDIFICACIÓN. NBE-QB-90. *Cubiertas con materiales bituminosos*. REAL DECRETO 1572/1900. Publicación BOE, 1990.

NORMA BÁSICA DE LA EDIFICACIÓN. MINISTERIO DE VIVIENDA. NBE-MV-301/70. *Impermeabilización de las cubiertas con materiales bituminosos*. Publicación BOE, 1970.

Anexos

Informe de condensaciones eCondensa

Azotea catalana

Capital de provincia: Barcelona		
Condiciones	T [°C]	HR [%]
Exteriores (para el mes de Noviembre)	12,5	74
Interiores	20	55

Tabla 26. Informe de condensaciones Azotea catalana parte I.

$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$		$P_n \leq P_{sat,n}$	Capa 1	Capa 2	Capa 3
f_{Rsi}	0,3	$P_{sat,n}$	1900,137	1998,867	2049,896
$f_{Rsi,min}$	0,56	P_n	1073,214	1214,62	1285,323

Tabla 27. Informe de condensaciones Azotea catalana parte II.

Nombre	μ	Pvap	Psat	Cond.Acum.
Cámara de aire ligeramente ventilada horizontal 10 cm	1	1073,214	1900,137	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1214,62	1998,867	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1285,323	2049,896	0

Tabla 28. Informe de condensaciones Azotea catalana parte III.

Hay condensaciones superficiales.

NO CUMPLE: Resultados correspondientes al mes de Noviembre. Se ha de tener en cuenta que la verificación de condensaciones según el CTE debe realizarse para el mes de Enero (salvo condensación y evaporación a lo largo del año).

Cubierta pre-convencional o Emergente en los 60

Capital de provincia: Barcelona		
Condiciones	T [°C]	HR [%]
Exteriores (para el mes de Enero)	8,8	73
Interiores	20	55

Tabla 29. Informe de condensaciones E60 parte I.

$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$		$P_n \leq P_{sat,n}$	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4
f_{Rsi}	0,811	$P_{sat,n}$	2137,099	2155,081	2194,813	2217,034
$f_{Rsi,min}$	0,56	P_n	828,21	1282,597	1283,506	1285,323

Tabla 30. Informe de condensaciones E60 parte II.

Nombre	μ	Pvap	Psat	Cond.Acum.
Hormigón celular curado en autoclave d 300	6	828,21	2137,099	0
Betún fieltro o lámina	50000	1282,597	2155,081	0
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < d < 1600	10	1283,506	2194,813	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1285,323	2217,034	0

Tabla 31. Informe de condensaciones E60 parte III.

CUMPLE

Cubierta convencional caliente I

Capital de provincia: Barcelona		
Condiciones	T [°C]	HR [%]
Exteriores (para el mes de Enero)	8,8	73
Interiores	20	55

Tabla 32. Informe de condensaciones PCTC1 parte I.

$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$		$P_n \leq P_{sat,n}$	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4
f_{Rsi}	0,867	$P_{sat,n}$	1167,607	2223,147	2236,218	2252,075
$f_{Rsi,min}$	0,56	P_n	847,323	847,526	1283,579	1285,323

Tabla 33. Informe de condensaciones PCTC1 parte II.

Nombre	μ	Pvap	Psat	Cond.Acum.
Hormigón convencional d 2400	120	847,323	1167,607	0
MW Lana mineral [0.04 W/[mK]]	1	847,526	2223,147	0
Betún fieltro o lámina	50000	1283,579	2236,218	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1285,323	2252,075	0

Tabla 34. Informe de condensaciones PCTC1 parte III.

CUMPLE

Cubierta invertida caliente I

Capital de provincia: Barcelona		
Condiciones	T [°C]	HR [%]
Exteriores (para el mes de Enero)	8,8	73
Interiores	20	55

Tabla 35. Informe de condensaciones PITC1 parte I.

$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$		$P_n \leq P_{sat,n}$	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4
f_{Rsi}	0,893	$P_{sat,n}$	1160,667	1164,639	2255,361	2268,245
$f_{Rsi,min}$	0,56	P_n	849,11	1164,639	1275,795	1285,323

Tabla 36. Informe de condensaciones PITC1 parte II.

Nombre	μ	Pvap	Psat	Cond.Acum.
Hormigón convencional d 2400	120	849,11	1160,667	0
Betún fieltro o lámina	50000	1164,639	1164,639	0,0091
XPS Expandido con dióxido de carbono CO2 [0.034 W/[mK]]	100	1275,795	2255,361	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1285,323	2268,245	0

Tabla 36. Informe de condensaciones PITC1 parte III.

La cantidad evaporada es superior a la condensada.

CUMPLE - Si hay condensación en el aislante, deberá justificar en proyecto que éste no sufre degradación.

Cubierta convencional fría I

Capital de provincia: Barcelona		
Condiciones	T [°C]	HR [%]
Exteriores (para el mes de Enero)	8,8	73
Interiores	20	55

Tabla 37. Informe de condensaciones PCTF1 parte I.

$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$		$P_n \leq P_{sat,n}$	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5
f_{Rsi}	0,898	$P_{sat,n}$	2146,475	2230,363	2255,764	2259,125	2271,936
$f_{Rsi,min}$	0,56	P_n	881,017	881,096	890,46	1280,641	1285,323

Tabla 38. Informe de condensaciones PCTF1 parte II.

Nombre	μ	Pvap	Psat	Cond.Acum.
XPS Expandido con dióxido de carbono CO2 [0.034 W/[mK]]	100	881,017	2146,475	0
Cámara de aire ligeramente ventilada horizontal 10 cm	1	881,096	2230,363	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	890,46	2255,764	0
Betún fieltro o lámina	50000	1280,641	2259,125	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1285,323	2271,936	0

Tabla 39. Informe de condensaciones PCTF1 parte III.

CUMPLE

Cubierta convencional caliente II

Capital de provincia: Barcelona		
Condiciones	T [°C]	HR [%]
Exteriores (para el mes de Enero)	8,8	73
Interiores	20	55

Tabla 40. Informe de condensaciones PCTC2 parte I.

$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$		$P_n \leq P_{sat,n}$	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6	Capa 7	Capa 8
f_{Rsi}	0,926	$P_{sat,n}$	1151,12	1151,37	2154,49	2213,81	2215,79	2276,57	2280,17	2289,55
$f_{Rsi,min}$	0,56	P_n	826,39	826,39	1285,32	1285,32	1285,32	1285,32	1285,32	1285,32

Tabla 41. Informe de condensaciones PCTC2 parte II.

Nombre	μ	Pvap	Psat	Cond.Acum.
Hormigón convencional d 1800	120	826,392	1151,122	0
Polietileno alta densidad [HDPE]	100000	826,392	1151,379	0
PUR Plancha con HFC o Pentano y rev. impermeable a gases [0.025 W/[mK]]	1E+15	1285,323	2154,499	0
EPS Poliestireno Expandido [0.037 W/[mK]]	20	1285,323	2213,81	0
Betún fieltro o lámina	50000	1285,323	2215,794	0
EPS Poliestireno Expandido [0.037 W/[mK]]	20	1285,323	2276,576	0
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1800 < d < 2000	10	1285,323	2280,174	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1285,323	2289,552	0

Tabla 42. Informe de condensaciones PCTC2 parte III.

CUMPLE

Cubierta invertida caliente II

Capital de provincia: Barcelona		
Condiciones	T [°C]	HR [%]
Exteriores (para el mes de Enero)	8,8	73
Interiores	20	55

Tabla 43. Informe de condensaciones PITC2 parte I.

$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$		$P_n \leq P_{sat,n}$	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6	Capa 7	Capa 8
f_{Rsi}	0,917	$P_{sat,n}$	1153,44	1191,95	1193,24	1232,92	2197,65	2265,37	2273,40	2283,89
$f_{Rsi,min}$	0,56	P_n	858,46	859,13	1193,24	1194,39	1274,96	1276,11	1278,41	1285,32

Tabla 44. Informe de condensaciones PITC2 parte II.

Nombre	μ	Pvap	Psat	Cond.Acum.
Hormigón convencional d 1800	120	858,467	1153,441	0
EPS Poliestireno Expandido [0.037 W/[mK]]	20	859,135	1191,955	0
Betún fieltro o lámina	50000	1193,247	1193,247	0,0026
EPS Poliestireno Expandido [0.037 W/[mK]]	20	1194,398	1232,924	0
XPS Expandido con hidrofluorcarbonos HFC [0.025 W/[mK]]	100	1274,965	2197,65	0
EPS Poliestireno Expandido [0.037 W/[mK]]	20	1276,115	2265,372	0
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1800 < d < 2000	10	1278,417	2273,408	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1285,323	2283,892	0

Tabla 45. Informe de condensaciones PITC2 parte III.

La cantidad evaporada es superior a la condensada.

CUMPLE - Si hay condensación en el aislante, se deberá justificar en proyecto que éste no sufre degradación.

Cubierta convencional fría II

Capital de provincia: Barcelona		
Condiciones	T [°C]	HR [%]
Exteriores (para el mes de Enero)	8,8	73
Interiores	20	55

Tabla 46. Informe de condensaciones PCTF2 parte I.

$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$		$P_n \leq P_{sat,n}$	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6	Capa 7	Capa 8
f_{Rsi}	0,926	$P_{sat,n}$	1151,07	1151,33	2151,27	2210,36	2212,33	2218,02	2280,31	2289,66
$f_{Rsi,min}$	0,56	P_n	826,39	826,39	1285,32	1285,32	1285,32	1285,32	1285,32	1285,32

Tabla 47. Informe de condensaciones PCTF2 parte II.

Nombre	μ	Pvap	Psat	Cond.Acum.
Hormigón convencional d 1800	120	826,392	1151,075	0
Polietileno alta densidad [HDPE]	100000	826,392	1151,331	0
PUR Plancha con HFC o Pentano y rev. impermeable a gases [0.025 W/[mK]]	1E+15	1285,323	2151,271	0
EPS Poliestireno Expandido [0.037 W/[mK]]	20	1285,323	2210,359	0
Betún fieltro o lámina	50000	1285,323	2212,336	0
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < d < 1600	10	1285,323	2218,027	0
Cámara de aire ligeramente ventilada horizontal 10 cm	1	1285,323	2280,31	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1285,323	2289,666	0

Tabla 48. Informe de condensaciones PCTF2 parte III.

CUMPLE

Cubierta invertida fría

Capital de provincia: Barcelona		
Condiciones	T [°C]	HR [%]
Exteriores (para el mes de Enero)	8,8	73
Interiores	20	55

Tabla 49. Informe de condensaciones PITF1 parte I.

$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$		$P_n \leq P_{sat,n}$	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6	Capa 7	Capa 8
f_{Rsi}	0,917	$P_{sat,n}$	1153,43	1191,94	1193,23	1232,90	2197,40	2203,75	2273,41	2283,90
$f_{Rsi,min}$	0,56	P_n	858,466	859,134	1193,23	1194,41	1276,95	1278,13	1278,24	1285,32

Tabla 50. Informe de condensaciones PITF1 parte II.

Nombre	μ	Pvap	Psat	Cond.Acum.
Hormigón convencional d 1800	120	858,466	1153,438	0
EPS Poliestireno Expandido [0.037 W/[mK]]	20	859,134	1191,944	0
Betún fieltro o lámina	50000	1193,236	1193,236	0,0027
EPS Poliestireno Expandido [0.037 W/[mK]]	20	1194,415	1232,906	0
XPS Expandido con hidrofluorcarbonos HFC [0.025 W/[mK]]	100	1276,952	2197,401	0
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < d < 1600	10	1278,131	2203,756	0
Cámara de aire ligeramente ventilada horizontal 10 cm	1	1278,249	2273,419	0
Plaqueta o baldosa cerámica	30	1285,323	2283,902	0

Tabla 51. Informe de condensaciones PITF1 parte III.

La cantidad evaporada es superior a la condensada.

CUMPLE - Si hay condensación en el aislante, se deberá justificar en proyecto que éste no sufre degradación.

Tablas de resultados de energía, emisiones y residuos

Cubierta: Azotea catalana					
Abreviatura: AC1					
Elemento y Material compositivo	Energía		CO ₂	Residuos	
	[MJ]	[KWh]	[Kg]	[Kg]	[m ³]
P1: Baldosín catalán	49,82	13,84	3,78	0,94	0,002237
P2: Rasilla cerámica	66,5	18,5	5	1,03	0,00284
S: Tabiquillos conejeros	59,03	16,4	7,02	1,38	0,00126
TOTAL	175,35	48,74	15,8	3,35	0,006337

Tabla 51. Desglose del impacto energético, emisiones y residuos de cada elemento de la AC1.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Emergente en los 60					
Abreviatura: E60					
Elemento y Material compositivo	Energía		CO ₂	Residuos	
	[MJ]	[KWh]	[Kg]	[Kg]	[m ³]
P: Baldosín catalán	49,82	13,84	3,78	0,94	0,002237
MA: Mortero de cal y bastardos	0,99	0,28	0,16	0,0123	0,0000327
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	179,83	49,95	26,41	0,4	0,0017
FP y AT: Hormigón celular sin áridos	176,62	49,06	35,23	0,44	0,0017
TOTAL	407,26	113,13	65,58	1,7923	0,0056697

Tabla 52. Desglose del impacto energético, emisiones y residuos de cada elemento de la E60.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Convencional Transitable Caliente					
Abreviatura: PCTC1					
Elemento y Material compositivo	Energía		CO ₂	Residuos	
	[MJ]	[KWh]	[Kg]	[Kg]	[m ³]
P: Rasilla cerámica	66,5	18,5	5	1,03	0,00284
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	179,83	49,95	26,41	0,4	0,0017
AT: Placa rígida de lana mineral de roca	202,06	56,13	12,81	0,0607	0,000459
FP: Hormigón en masa con grava normal, vibrado	91,58	25,44	14,54	0,19	0,000496
TOTAL	539,97	150,02	58,76	1,6807	0,005495

Tabla 53. Desglose del impacto energético, emisiones y residuos de cada elemento de la PCTC1.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Invertida Transitable Caliente					
Abreviatura: PITC1					
Elemento y Material compositivo	Energía		CO ₂	Residuos	
	[MJ]	[KWh]	[Kg]	[Kg]	[m ³]
P: Rasilla cerámica	66,5	18,5	5	1,03	0,00284
AT: Poliestireno extrusionado (CO2)	280,8	78	41,45	0,1	0,000458
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	179,83	49,95	26,41	0,4	0,0017
FP: Hormigón en masa con grava normal, vibrado	91,58	25,44	14,54	0,19	0,000496
TOTAL	618,71	171,89	87,4	1,72	0,005494

Tabla 54. Desglose del impacto energético, emisiones y residuos de cada elemento de la PITC1.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Convencional Transitable Fría					
Abreviatura: PCTF1					
Elemento y Material compositivo	Energía		CO ₂	Residuos	
	[MJ]	[KWh]	[Kg]	[Kg]	[m ³]
P: Solado de baldosín	49,82	13,84	3,78	0,94	0,002237
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	179,83	49,95	26,41	0,4	0,0017
FP: Doble tablero de rasilla cerámica	133	37	10	2,06	0,005674
S: Tabiques de ladrillo hueco	59,03	16,4	7,02	1,38	0,00126
AT: Poliestireno extrusionado (CO2)	280,8	78	41,45	0,1	0,000458
TOTAL	702,48	195,19	88,66	4,88	0,011329

Tabla 55. Desglose del impacto energético, emisiones y residuos de cada elemento de la PCTF1.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Convencional Transitable Caliente					
Abreviatura: PCTC2					
Elemento y Material compositivo	Energía		CO ₂	Residuos	
	[MJ]	[KWh]		[Kg]	[m ³]
P: Solado fijo	49,82	13,84	3,78	0,94	0,002237
MA: Mortero de cal	0,99	0,28	0,16	0,0123	0,0000327
CSa: Filtro de poliester	12,09	3,36	1,78	0,0256	0,0000988
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	179,83	49,95	26,41	0,4	0,0017
CS: Filtro de poliester	12,09	3,36	1,78	0,0256	0,0000988
AT: Espuma rígida de poliuretano (HFC)	343	95,28	50,63	0,0647	0,000335
B: Lámina de polietileno (HDPE)	47,94	13,32	7,08	0,18	0,000749
FP: Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	91,58	25,44	14,54	0,19	0,000496
TOTAL	737,34	204,83	106,16	1,8382	0,0057473

Tabla 56. Desglose del impacto energético, emisiones y residuos de cada elemento de la PCTC2.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Invertida Transitable Caliente					
Abreviatura: PITC2					
Elemento y Material compositivo	Energía		CO ₂	Residuos	
	[MJ]	[KWh]		[Kg]	[m ³]
P: Solado fijo	49,82	13,84	3,78	0,94	0,002237
MA: Mortero de cal	0,99	0,28	0,16	0,0123	0,0000327
Csa: Filtro de poliester	12,09	3,36	1,78	0,0256	0,0000988
AT: Poliestireno extruido (XPS-HFC)	245,7	68,25	36,26	0,0881	0,000397
CS: Filtro de poliester	12,09	3,36	1,78	0,0256	0,0000988
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	179,83	49,95	26,41	0,4	0,0017
CS: Filtro de poliester	12,09	3,36	1,78	0,0256	0,0000988
FP: Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	91,58	25,44	14,54	0,19	0,000496
TOTAL	604,19	167,84	86,49	1,7072	0,0051591

Tabla 57. Desglose del impacto energético, emisiones y residuos de cada elemento de la PITC2.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Convencional Transitable Fría					
Abreviatura: PCTF2					
Elemento y Material compositivo	Energía		CO ₂	Residuos	
	[MJ]	[KWh]	[Kg]	[Kg]	[m ³]
P: Solado fijo	49,82	13,84	3,78	0,94	0,002237
S: Viguetas de hormigón pretensado 15 cm de altura	188,62	52,4	16,67	0	0
CSa: Mortero de cal	0,8	0,22	0,12	0,0123	0,0000327
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	179,83	49,95	26,41	0,4	0,0017
CS: Fieltro de poliéster	12,09	3,36	1,78	0,0256	0,0000988
AT: Espuma rígida de poliuretano (planca HFC)	343	95,28	50,63	0,0647	0,000335
B: Lámina de polietileno (HDPE)	47,94	13,32	7,08	0,18	0,000749
FP: Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	91,58	25,44	14,54	0,19	0,000496
TOTAL	913,68	253,81	121,01	1,8126	0,0056485

Tabla 58. Desglose del impacto energético, emisiones y residuos de cada elemento de la PCTF2.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Invertida Transitable Fría					
Abreviatura: PITF1					
Elemento y Material compositivo	Energía		CO ₂	Residuos	
	[MJ]	[KWh]	[Kg]	[Kg]	[m ³]
P: Solado fijo	49,82	13,84	3,78	0,94	0,002237
S: Viguetas de hormigón pretensado 15 cm de altura	188,62	52,4	16,67	0	0
Csa: Mortero de cal	0,8	0,22	0,12	0,0123	0,0000327
AT: Poliestireno extruido (XPS-HFC)	245,7	68,25	36,26	0,0881	0,000397
CS: Fieltro de poliéster	12,09	3,36	1,78	0,0256	0,0000988
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	179,83	49,95	26,41	0,4	0,0017
CS: Fieltro de poliéster	12,09	3,36	1,78	0,0256	0,0000988
FP: Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	91,58	25,44	14,54	0,19	0,000496
TOTAL	780,53	216,82	101,34	1,6816	0,0050603

Tabla 59. Desglose del impacto energético, emisiones y residuos de cada elemento de la PITF1.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Tablas de residuos según la clasificación LER

Cubierta: Azotea catalana					
Abreviatura: AC1					
Elemento y Material compositivo	Residuos de embalaje				Residuos de colocación
	No especiales			Especiales	Inertes
	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Hormigón, ladrillo y materiales cerámicos
P1: Baldosín catalán	0	0,0648	0,21	0	0,66
P2: Rasilla cerámica	0	0,0875	0,2825	0	0,66
S: Tabiquillos conejeros	0,042	0,08708	0,04204	0	1,245
MASA LER [Kg/m2]	0,042	0,23938	0,53454	0	2,565
TOTAL [Kg/m2]	3,38092				

Tabla 60. Desglose de los residuos de embalaje y colocación cada elemento de la AC1.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Emergente en los 60					
Abreviatura: E60					
Elemento y Material compositivo	Residuos de embalaje				Residuos de colocación
	No especiales			Especiales	Inertes
	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Hormigón, ladrillo y materiales cerámicos
P: Baldosín catalán	0	0,0648	0,21	0	0,66
MA: Mortero de cal y bastardos	0,000209	0,0038	0,0083	0	0
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0	0,015	0,38	0,000853	0
FP y AT: Hormigón celular sin áridos	0,007	0,12	0,28	0,0283	0
MASA LER [Kg/m2]	0,007209	0,2036	0,8783	0,029153	0,66
TOTAL [Kg/m2]	1,778262				

Tabla 61. Desglose de los residuos de embalaje y colocación cada elemento de la E60.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Convencional Transitable Caliente					
Abreviatura: PCTC1					
Elemento y Material compositivo	Residuos de embalaje			Residuos de colocación	
	No especiales			Especiales	Inertes
	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Hormigón, ladrillo y materiales cerámicos
P: Rasilla cerámica	0	0,0875	0,2825	0	0,66
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0	0,015	0,38	0,000853	0
AT: Placa rígida de lana mineral de roca	0,0039	0,0568	0	0	0
FP: Hormigón en masa con grava normal, vibrado	0,0032	0,0568	0,13	0	0
MASA LER [Kg/m2]	0,0071	0,2161	0,7925	0,000853	0,66
TOTAL [Kg/m2]	1,676553				

Tabla 62. Desglose de los residuos de embalaje y colocación cada elemento de la PCTC1.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Invertida Transitable Caliente					
Abreviatura: PITC1					
Elemento y Material compositivo	Residuos de embalaje			Residuos de colocación	
	No especiales			Especiales	Inertes
	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Hormigón, ladrillo y materiales cerámicos
P: Rasilla cerámica	0	0,0875	0,2825	0	0,66
AT: Poliestireno extrusionado (CO2)	0,0196	0,0818	0	0	0
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0	0,015	0,38	0,000853	0
FP: Hormigón en masa con grava normal, vibrado	0,0032	0,0568	0,13	0	0
MASA LER [Kg/m2]	0,0228	0,2411	0,7925	0,000853	0,66
TOTAL [Kg/m2]	1,717253				

Tabla 63. Desglose de los residuos de embalaje y colocación cada elemento de la PITC1.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Convencional Transitable Fría					
Abreviatura: PCTF1					
Elemento y Material compositivo	Residuos de embalaje				Residuos de colocación
	No especiales			Especiales	Inertes
	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Hormigón, ladrillo y materiales cerámicos
P: Solado de baldosín	0	0,0648	0,21	0	0,66
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0	0,015	0,38	0,000853	0
FP: Doble tablero de rasilla cerámica	0	0,175	0,565	0	1,32
S: Tabiques de ladrillo hueco	0,042	0,08708	0,04204	0	1,245
AT: Poliestireno extrusionado (CO2)	0,0196	0,0818	0	0	0
MASA LER [Kg/m2]	0,0616	0,42368	1,19704	0,000853	3,225
TOTAL [Kg/m2]	4,908173				

Tabla 64. Desglose de los residuos de embalaje y colocación cada elemento de la PCTF1.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Convencional Transitable Caliente					
Abreviatura: PCTC2					
Elemento y Material compositivo	Residuos de embalaje				Residuos de colocación
	No especiales			Especiales	Inertes
	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Hormigón, ladrillo y materiales cerámicos
P: Solado fijo	0	0,0648	0,21	0	0,66
MA: Mortero de cal	0,000209	0,0038	0,0083	0	0
CSa: Filtro de poliéster	0,0022	0	0,0234	0	0
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0	0,015	0,38	0,000853	0
CS: Filtro de poliéster	0,0022	0	0,0234	0	0
AT: Espuma rígida de poliuretano (HFC)	0,0024	0,0624	0	0	0
B: Lámina de polietileno (HDPE)	0,000421	0,0084	0,17	0	0
FP: Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	0,0032	0,0568	0,13	0	0
MASA LER [Kg/m2]	0,01063	0,2112	0,9451	0,000853	0,66
TOTAL [Kg/m2]	1,827783				

Tabla 65. Desglose de los residuos de embalaje y colocación cada elemento de la PCTC2.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Invertida Transitable Caliente					
Abreviatura: PITC2					
Elemento y Material compositivo	Residuos de embalaje				Residuos de colocación
	No especiales			Especiales	Inertes
	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Hormigón, ladrillo y materiales cerámicos
P: Solado fijo	0	0,0648	0,21	0	0,66
MA: Mortero de cal	0,000209	0,0038	0,0083	0	0
Csa: Filtro de poliéster	0,0022	0	0,0234	0	0
AT: Poliestireno extruido (XPS-HFC)	0,0171	0,071	0	0	0
CS: Filtro de poliéster	0,0022	0	0,0234	0	0
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0	0,015	0,38	0,000853	0
CS: Filtro de poliéster	0,0022	0	0,0234	0	0
FP: Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	0,0032	0,0568	0,13	0	0
MASA LER [Kg/m2]	0,027109	0,2114	0,7985	0,000853	0,66
TOTAL [Kg/m2]	1,697862				

Tabla 66. Desglose de los residuos de embalaje y colocación cada elemento de la PCTC2.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Convencional Transitable Fría					
Abreviatura: PCTF2					
Elemento y Material compositivo	Residuos de embalaje				Residuos de colocación
	No especiales			Especiales	Inertes
	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Hormigón, ladrillo y materiales cerámicos
P: Solado fijo	0	0,0648	0,21	0	0,66
CSa: Mortero de cal	0,000209	0,0038	0,0083	0	0
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0	0,015	0,38	0,000853	0
CS: Filtro de poliéster	0,0022	0	0,0234	0	0
AT: Espuma rígida de poliuretano (plancha HFC)	0,0024	0,0624	0	0	0
B: Lámina de polietileno (HDPE)	0,000421	0,0084	0,17	0	0
FP: Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	0,0032	0,0568	0,13	0	0
MASA LER [Kg/m2]	0,00843	0,2112	0,9217	0,000853	0,66
TOTAL [Kg/m2]	1,802183				

Tabla 67. Desglose de los residuos de embalaje y colocación cada elemento de la PCTF2.

Fuente: <http://itec.cat/nouBedec.c/> MediAmbient

Cubierta: Plana Invertida Transitable Fría					
Abreviatura: PITF1					
Elemento y Material compositivo	Residuos de embalaje			Residuos de colocación	
	No especiales			Especiales	
	Plástico	Madera	Papel y cartón	Sustancias contaminantes	Inertes
P: Solado fijo	0	0,0648	0,21	0	0,66
Csa: Mortero de cal	0,000209	0,0038	0,0083	0	0
AT: Poliestireno extruido (XPS-HFC)	0,0171	0,071	0	0	0
CS: Filtro de poliéster	0,0022	0	0,0234	0	0
I: Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0	0,015	0,38	0,000853	0
CS: Filtro de poliéster	0,0022	0	0,0234	0	0
FP: Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	0,0032	0,0568	0,13	0	0
MASA LER [Kg/m2]	0,024909	0,2114	0,7751	0,000853	0,66
TOTAL [Kg/m2]	1,672262				

Tabla 68. Desglose de los residuos de embalaje y colocación cada elemento de la PITF1.

Fuente: <http://itec.cat/houBedec.c/> MediAmbient

Agradecimientos

En agradecimiento dedico estas líneas a todos los que me han ayudado llevar a cabo este proyecto.

En primer lugar agradecer a Pere Alavedra por la oportunidad brindada, a Licinio Alfaro por guiarme en la realización del estudio. Agradecer también a mis compañeros del departamento de BEDEC, ITeC, por haberme resuelto muchas dudas esenciales.

Por último, agradecer a mi amigo Samuel Campillo, por toda su ayuda y por las magníficas ilustraciones de las cubiertas realizadas.